

Tiere auf Wanderschaft

Wissenschaftler erforschen die großen alljährlichen Wanderungen von Tierherden, Vogelschwärmen oder Insekten, um die Verbreitung und das Zugverhalten der Tiere besser zu verstehen – nicht zuletzt im Hinblick auf biologische Invasionen und pandemische Krankheiten. Das Forschungsprojekt ICARUS erfasst die Tierwanderungen bald mit Hilfe der Internationalen Raumstation ISS.

VON MARTIN WIKELSKI, PHILIPP HARTL UND ALOYSIUS WEHR

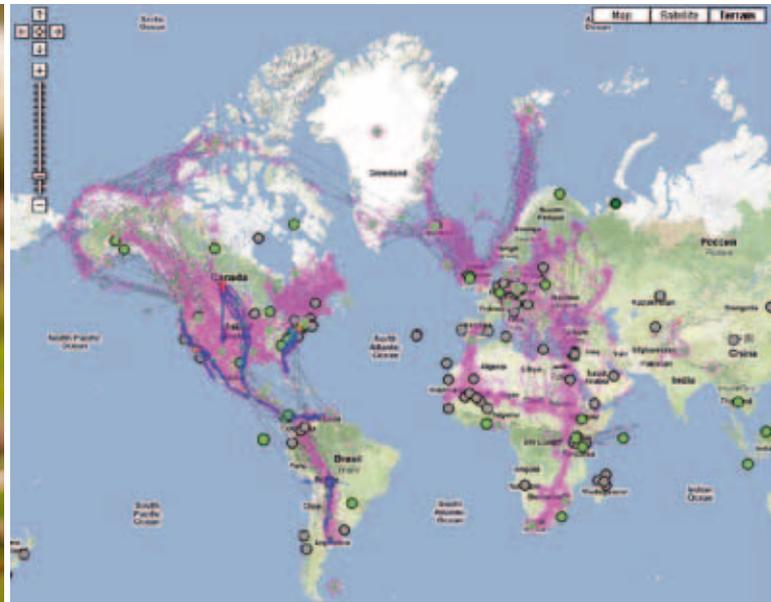
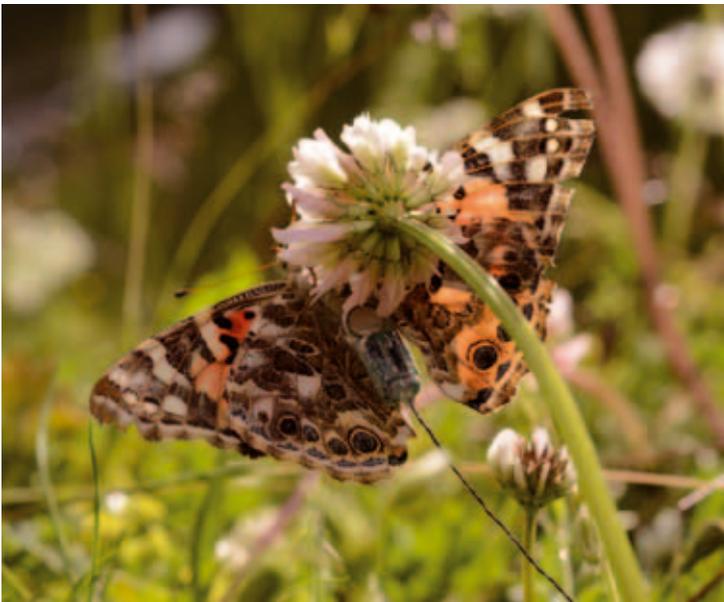


Abb. 1: Ausschnitt aus der Datenbank „Movebank“ (www.movebank.org) mit Zugrouten von Vögeln weltweit. Nur wenige Routen von großen Arten sind bekannt, viele Gegenden der Welt sind noch „weiße Flecken“. Nur große Vögel kann man mit ARGOS Satellitensendern weltweit beobachten, kleine Tiere wie Schmetterlinge können mit 0,2-g-Peilsendern nur von Hand telemetriert werden (zu Fuß, per Auto oder Flugzeug).

Das Wanderungsverhalten der Tiere

Tiere gehören zu den wichtigsten Merkmalen unserer Erde, und die überwiegende Mehrheit von ihnen ist ständig auf Wanderschaft. Details der Wanderrouten kennen wir aber nur von ganz wenigen Tierarten. Wie finden sie ihre Wege, welchen Stress nehmen sie auf sich? Welche Folgen haben ihre Wanderschaft und ihr Verhalten im positiven und negativen Sinne auf unseren und ihren Lebensraum? Wir verstehen bislang auch kaum, wie Tiere wegen kontinuierlicher Umweltänderungen, etwa auf Grund von Naturereignissen und neuerdings vor allem auch wegen menschlicher Eingriffe in die Natur, ihr Wanderverhalten ändern bzw. ändern müssen oder sogar aussterben.

Solange nicht klar ist, wo, wann, wie und warum ein einzelnes Tier einer Population stirbt, kann nicht verstanden werden, wie sich Tiere an ständig verändernde Umweltbedingungen anpassen. Ein dramatisches Beispiel sind die jährlich etwa 20 Milliarden Zugvögel, von denen jedes Jahr ca. 10 Milliarden sterben, ohne dass wir ihr Schicksal voraussagen oder beobachten könnten.

Tier und Mensch

Tiere spielen eine große Rolle für uns Menschen und unseren Lebensraum. Ihre Verhaltensänderungen dienen uns als Sensoren und Frühindikatoren, denn Tiere sind die Betroffenen menschlichen Handelns. Sie sind aber auch unmittelbar für unsere eigene Existenz extrem wichtig, etwa im positiven Sinne als Nahrungsquelle oder im negativen Sinne als deren Vernichter. Sie spielen ferner wegen der rapide wachsenden Bevölkerungsdichte eine zunehmend wichtigere Rolle als Krankheitsüberträger und Verursacher von

Epidemien. Etwa 70 % der weltweiten Krankheitsepidemien, sei es SARS, das West Nil Virus oder die Vogelgrippe, entstehen als sog. Zoonosen (also von Tier zu Mensch bzw. von Mensch zu Tier übertragene Infektionskrankheiten) im Zusammenspiel zwischen Wildtieren, Nutztieren und Menschen.

Dass wir so wenig wissen, liegt in erster Linie daran, dass die meisten Tierarten relativ klein, scheu und flink sind und sich ihrem Umfeld sehr gut anpassen. Mit unseren Sinnen können wir sie daher nur schwer entdecken und verfolgen. Mit modernster Elektronik werden heute in lokalen Bereichen Tiere, die mit Mikrosendern (Plattform Transmitter Terminal, PTT) bestückt sind (s. Abb. 1, Schmetterling), durch Funkpeilung lokalisiert. Im Regionalbereich wird das Mobilfunknetz mit seinen Ortungs- und Datenübertragungsmöglichkeiten genutzt, jedoch mit Sendemodulen, die zu schwer für Kleinsttiere sind. Für das Studium der globalen Wanderung von Wildtieren sind satellitengestützte Systeme erforderlich, bei denen ein PTT seine Kennwerte und den Ort des Tieres mit minimaler Sendeleistung über einen Satellitentransponder zum „Beobachter“ überträgt.

Tiertracking mit Hilfe von Satelliten

Seit etwa 20 Jahren ermöglicht nach diesem Grundprinzip das sog. ARGOS System (Advanced Research and Global Observation Satellite) die Beobachtung der globalen Tierwanderungen, allerdings nur bei großen Tieren. Es wurde in den 1970er Jahren von der französischen Raumfahrtagentur CNES für die Belange der Meteorologie realisiert. Ursprünglich war das System bodenseitig fast ausschließlich für die Datenübertragung der „data collecting platforms“ vorgesehen, die weltweit verteilt an entlegenen Orten der Erde aufgestellt waren, ausgestattet mit automatisch arbeitenden kleinen Sendern, die die lokalen meteorologischen Daten wie Druck, Temperatur, Feuchtigkeit und Wind zum Wettersatelliten senden, sobald funktechnischer Kontakt möglich ist. Später wurden die ARGOS-Zusatznutzlasten für das Tiertracking erweitert. Obwohl die Weiterentwicklung dieser Nutzlast in den zurückliegenden Jahrzehnten Schritt für Schritt erfolgreich vorangetrieben wurde, ist sie jedoch schwierig und langwierig, weil die Satellitentypen, auf denen diese ARGOS-Transponder-Nutzlast mitfliegt, operationelle Wettersatelliten sind. Diese müssen notwendigerweise auf eine Lebensdauer von zehn bis 15 Jahren ausgelegt sein und jede Erneuerung auf der Raumfahrt-

seite ist deshalb frühestens nach einem solchen Zeitraum möglich. Außerdem muss bei einem operationell arbeitenden System jede Erneuerung im Gesamtsystem, also satelliten- und tiereseitig, notwendigerweise immer „rückwärts kompatibel sein“. Rasche Änderungen, wie sie auf Grund der technologischen Fortschritte in der Mikroelektronik im terrestrischen Mobilfunk im zweijährigen Rhythmus bekanntlich üblich sind, lassen sich daher mit ARGOS nicht realisieren.

Deshalb wurde das ICARUS-Forschungsprojekt angeregt, das sich derzeit in der Konzeptphase befindet. Mit ihm sollen unter Nutzung der Internationalen Raumstation ISS neue Konzepte entwickelt und erprobt werden, die eine schnelle Umsetzung der technologischen Fortschritte ermöglichen, frei von den oben erwähnten Zwängen. Das Vorhaben soll den Wissenschaftlern in den nächsten sechs bis acht Jahren unverzüglich jeweils die neuesten wissenschaftlichen „Werkzeuge“ zur Verfügung stellen, die sie benötigen. Allerdings ist die globale Datenübertragung von Mikrosendern eine große technische Herausforderung.

Signalübertragung über große Entfernungen

Eine dieser Schwierigkeiten ist der Funkkontakt zwischen dem Sender, der am Tier angebracht ist, und dem Satelliten (der sog. Up-link). Je höher der Satellit fliegt, desto schwächer ist das Signal, das er empfängt. Der Mikrosender des Tieres muss fast den ganzen oberen Halbraum ausstrahlen, da die Lage des Tieres nicht nur im Flug beliebig sein kann, sondern auch dann, wenn es verletzt oder tot am Boden liegt. Die Satellitenantenne hingegen kann eine bevorzugte Orientierung in Richtung Erde haben und eine größere (z. B. einen Quadratmeter große) Wirkfläche besitzen. Aber selbst dann kommt am Satellitenempfänger höchstens der 10^{-14} -te Bruchteil der Sendeleistung an, wenn die Schrägdistanz 1.000 km beträgt. Weitere ungünstige Einflüsse wie z. B. Mehrwegeeffekte oder Regen können zusätzlich zur Signalschwächung beitragen. Die Frequenzwahl für die Signalübertragung ist durch verschiedene Faktoren bestimmt. Bisher war und liegt der bevorzugte Bereich bei etwa 400 MHz, doch ist dies wegen der weltweiten Vorschriften der Regulierungsbehörden noch keineswegs endgültig festgelegt.

Beim Up-link ist neben der sehr kleinen Sendeleistung des Mikrosenders, die zwischen einigen wenigen und höchstens 50 Milliwatt liegen sollte, noch ein weiteres Problem kritisch: Alle Sender, die sich im momentanen Empfangsbereich des Satellitentransponders befinden, senden unkoordiniert ihre Signale. Die Positionen

DIE AUTOREN

Prof. Dr. Martin Wikelski ist Direktor des Max-Planck-Instituts für Ornithologie Radolfzell und Leiter der Abteilung Ornithologie der Universität Konstanz.

Prof. Dr. Philipp Hartl ist Emeritus der Universität Stuttgart, Mitglied der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften sowie Mitglied der Deutschen Geodätischen Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften.

Dr.-Ing. Aloysius Wehr ist stellvertretender Direktor des Instituts für Navigation der Universität Stuttgart.

der mit Sender versehenen Tiere (z. B. Zugvögel) können jedoch weit auseinander liegen – im Extremfall rund 5.000 km – oder auch sehr nahe beieinander. Das am Satelliten empfangene Signalgemisch kann deshalb sowohl leistungsmäßig als auch im relativen Dopplerversatz, von dem nachfolgend die Rede ist, sehr unterschiedliche Schwankungen aufweisen.

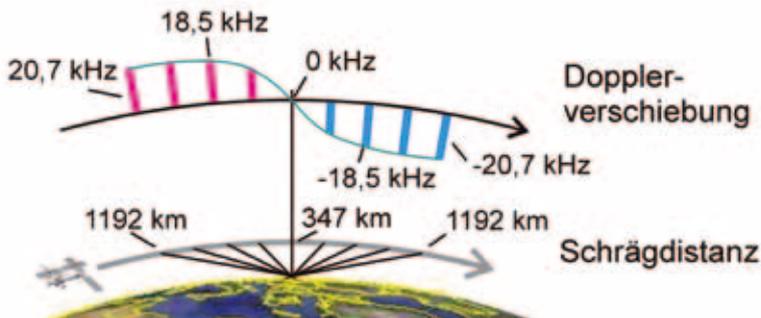
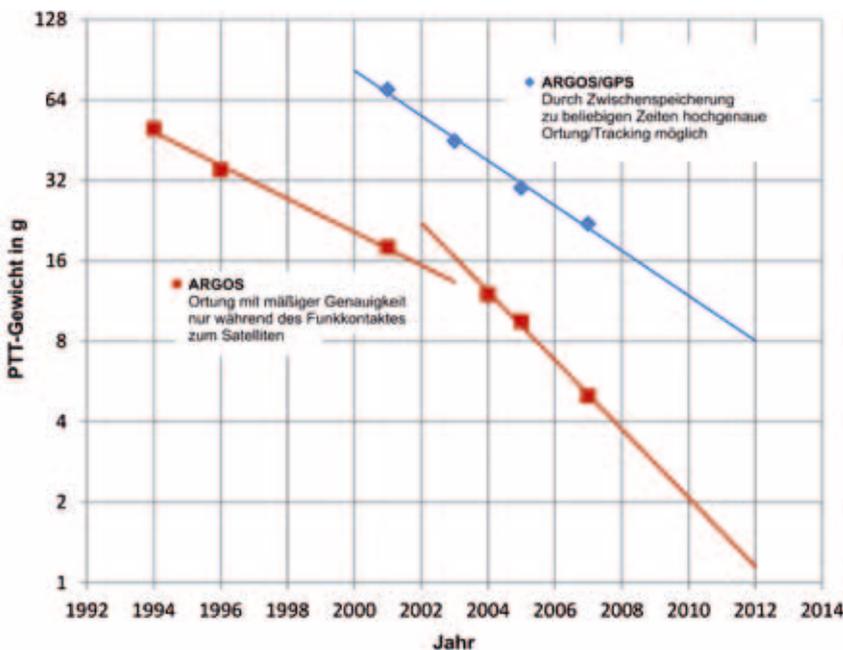


Abb. 2: Dopplerfrequenzverschiebungen in der Kommunikation zwischen Sender und Satellit.

Dopplerfrequenzverschiebungen

Wenn sich zwei Objekte, in unserem Fall Tier und Satellit, relativ zueinander bewegen (also aufeinander zu oder voneinander weg), dann empfängt der Satellit ein um die sog. Dopplereffekt verschobenes Signal, es ändert sich also ständig die Frequenz (Abb. 2). Diesen Effekt, der auch Dopplereffekt heißt, kann man z. B. hören, wenn ein Feuerwehrauto mit Sirene vorbeifährt. Nur in dem Moment, wenn die beiden Objekte einander am nächsten sind, beträgt die Frequenzabweichung 0 Hz.

Abb. 3: Gewichtsreduktion von ARGOS PTTs mit Solarzelle im Verlauf der Jahre.



Für das Tiertracking kommen nur niedrig fliegende Satelliten mit Bahnhöhen zwischen etwa 300 und 1.000 km in Frage, da die Distanz zwischen Satellit und Sender möglichst klein sein soll. Diese Satelliten haben eine hohe Relativgeschwindigkeit zu den Tieren, aber zugleich auch kurze Kontaktzeiten zu den einzelnen Sendern. Die Dopplereffektverschiebung ändert sich während eines Überfluges kontinuierlich. Dies hat eine negative und eine positive Auswirkung: Es ist einerseits schwierig, das individuelle Signal eines ganz bestimmten Tieres aus dem Summensignal herauszufiltern. Andererseits kann der Dopplerversatz (rot bzw. blau in Abb.2) aber auch zur Positionsbestimmung genutzt werden, und zwar beim sog. ARGOS-Doppler-Verfahren: Während des Überfluges werden drei bis fünf Dopplerverschiebungen entlang der S-förmigen Dopplerkurve auf den Wettersatelliten gemessen, hervorgerufen durch die von den Sendern abgestrahlten Signalen. Da die Frequenz und der Orbit des Satelliten bekannt sind, kann die Position des Tieres nun prinzipiell im Bereich von einem bis einigen hundert Metern bestimmt werden. In der Praxis ergeben sich jedoch oft Positionsirrtümer von mehreren 10 bis 100 km.

Fortschritte in der Gewichtsreduzierung bei ARGOS-PTTs

Die ersten „Kleinsender“ wogen mehrere Kilogramm und waren fest an den Tieren installiert. Heute sind die ARGOS-Sender für den mobilen Einsatz auf Kleintieren geeignet und wiegen in der leichtesten Ausführung 5 g (Abb. 3, rote Linie). Damit kann man Vögel ab einem Gewicht von 200 g ausstatten – von den rund 10.000 Vogelarten können also 1.500 überwacht werden. Einen großen Fortschritt bei der Gewichtsreduktion brachte das Jahr 2004: Durch Verwendung einer großflächigeren Solarzelle verkleinerte sich die Batteriegröße. Von da an verlief die Entwicklung nach dem Moore'schen Gesetz. Man sieht jedoch, dass die Extrapolation auf der Basis der eingezeichneten Trendlinie zu optimistisch ist: Die weitere Gewichtsreduktion nach der Fünfgamm-Version blieb aus. Zudem liefern gerade die kleinen Sender derzeit noch sehr unzuverlässige Ortungsdaten, die aufwändige Kontrollprozesse durchlaufen müssen.

Wenn man die Sender mit einem GPS-Empfänger ausstattet, lässt sich die Ortungsgenauigkeit in den Meterbereich steigern, dann steigt aber wiederum das Gewicht: Die ARGOS-GPS-Sender

wiegen derzeit noch rund 22 g und sind deshalb nur für weniger als ca. 500 Tierarten nutzbar (Abb. 3, blaue Linie).

ICARUS – Tiertracking mit Hilfe der internationalen Raumstation ISS

Das operative Trackingsystem ARGOS zeigt, wie man Tierwanderungen mit Hilfe von Satelliten weltweit erfassen kann. Mit dem stetigen Fortschritt in der Mobilfunktechnik eröffnen sich derzeit aber Schritt für Schritt neue Möglichkeiten der extremen Miniaturisierung und der Systemverbesserung. Die meisten Tierarten sind so klein, dass wir noch mindestens ein bis zwei Größenordnungen hinsichtlich der Massenreduktion und der Datenrate gewinnen müssen, um sie erfassen zu können. Das wird nur durch einen sehr umfassenden systemischen Ansatz und mit einem flexibel angelegten Experimentalprogramm möglich, wie es das ICARUS-Projekt darstellt. Sein Entwurf (Abb. 4) sieht die Internationale Raumstation ISS als Experimentierbasis vor, die dazu dient, optimale Trackingverfahren in Bezug auf Energieverbrauch und Zuverlässigkeit bei möglichst großen Stichproben zu entwickeln. Außerdem werden die mit ICARUS erfassten Trackingdaten über Ethernet an Datenbanken wie z. B. „Movebank“ (Abb. 1, www.movebank.org) weitergeleitet und stehen so Forschergruppen weltweit zur Verfügung.

Auf die weiteren Besonderheiten von ICARUS kann nur stichwortartig hingewiesen werden: Die Raumfahrtgeräte arbeiten unter laborähnlichen Bedingungen, besondere Strahlungs-, Vakuum- und Temperaturtests entfallen weitestgehend. Bei den periodischen Versorgungsflügen können häufig neuere Geräte mittransportiert werden.

Die ISS ermöglicht ein weites Experimentier- und Anwendungsfeld, das sowohl für Natur- als auch für Ingenieurwissenschaftler interessant ist. Aus diesem Grunde wird ICARUS dankenswerterweise durch das DLR und die ESA gefördert und von internationalen Organisationen wie der FAO und der UNEP/CMS (Bonner Konvention zum Schutz wandernder Tierarten) unterstützt.

Erste Ergebnisse von ICARUS

Erste Demonstrationsaufbauten für Konzeptstudien wurden im Auftrag des Max-Planck-Instituts

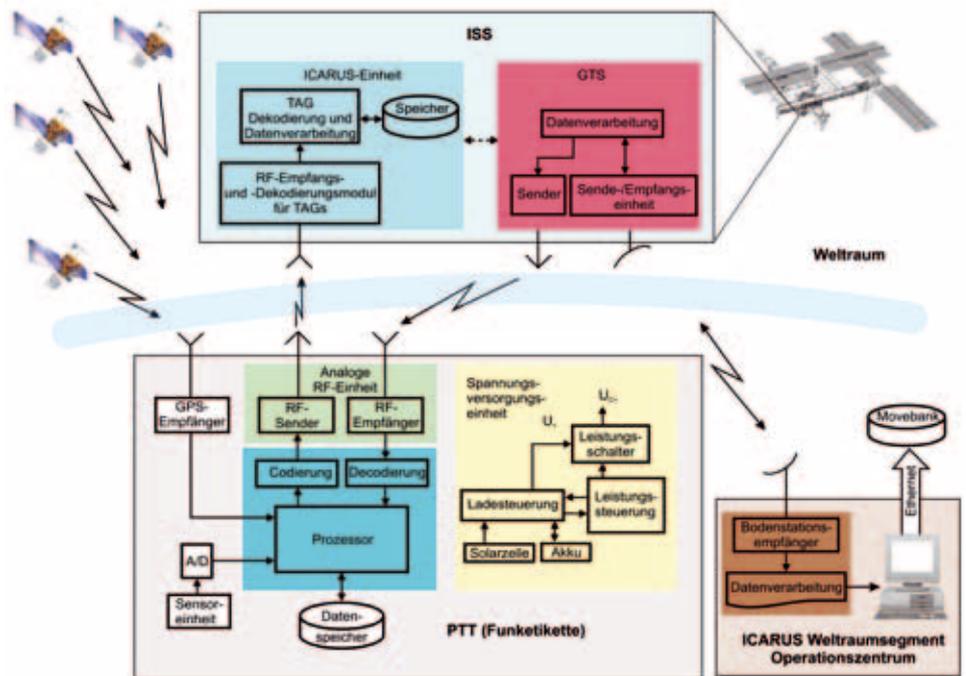


Abb. 4: Systemübersicht über ICARUS, ein weltweites System zur Beobachtung kleiner bewegter Objekte.

für Ornithologie und finanziert durch den Innovationsfonds der Max-Planck-Gesellschaft beim Steinbeis Transferzentrum Raumfahrt (TZR) und an der Universität Stuttgart durchgeführt. Es entstanden erste Sender mit kommerziellen Bauelementen, deren Gewichts- und Leistungsaufnahmebilanz viel versprechend sind: Durch einen höheren Integrationsgrad, z. B. in Form von ASICs (anwendungsspezifische integrierte Schaltung), werden GPS-Sender mit einem Gewicht von nur wenigen Gramm möglich (Tab. 1).

Tab. 1: Kaum mehr als 5 g Gewicht: Gewichts- und Leistungsaufnahmebilanz der ersten für ICARUS gebauten Sender.

Gewicht der ersten ICARUS-Sender	
Sendesignal und Takterzeugung	0,73 g
GPS-Empfänger inkl. GPS-Antenne	4,40 g
PSOC-Chip (FPGA) klein	0,17 g
Sendeantenne (ohne Halterung)	0,12 g
Solarzelle 22 mm x 7 mm	0,50 g
Gesamtgewicht der Bauteile	5,92 g
Leistungsaufnahme (Sender aktiv)	147 mW
Leistungsaufnahme (Standby)	87,6 µW