

# Prognosen in Biologie und Umweltwissenschaften

Michael Wink

Institut für Pharmazie und Molekulare Biotechnologie, Universität Heidelberg

**Zusammenfassung** Wenn Naturwissenschaftler wissenschaftliche Prognosen machen, so beruhen diese meist auf begründeten und anerkannten Fakten. Sie nehmen an, dass zukünftige Entwicklungen so verlaufen wie vergangene. Dieses Vorgehen funktioniert, wenn die zukünftigen Entwicklungen linear oder geordnet verlaufen, versagen aber häufig bei sehr komplexen oder chaotischen Systemen. Die Hilfsmittel der Wissenschaft sind häufig Wahrscheinlichkeitsrechnung, Hochrechnungen oder Modellierungen, die heute auf sehr leistungsfähigen Rechnersystemen durchgeführt werden können. In diesem Review werden Beispiele von renommierten Wissenschaftlern geschildert, deren Prognosen sich bewahrheitet haben und anderen, die komplett daneben lagen, weil die Datenlage nicht eindeutig war oder weil Ergebnisse überinterpretiert wurden. Gute Vorhersagen und Hypothesen müssen überprüfbar, d. h. im Sinne von Karl Popper falsifizierbar sein. Stimmen experimentelle Prüfungen nicht mit einer Hypothese überein, so wird sie falsifiziert, verworfen und meist durch eine bessere ersetzt. An der Möglichkeit der grundsätzlichen Falsifizierbarkeit lassen sich wissenschaftlich nützliche Hypothesen und Prognosen erkennen und von manipulierten oder subjektiven Umfragen und Vorhersagen unterscheiden.

## 1 Einführung

Wir leben in einer Welt, die von Wandel und Ungewissheit geprägt ist (Wink & Funke, 2016); dies ist für uns Menschen beunruhigend und daher machen wir uns Sorgen darüber, was die Zukunft bringen könnte. Wir wünschen uns eine stabile Welt mit Gewissheiten. Ian Stewart (2022) fasst das Dilemma zusammen: „Ungewissheit ist nicht nur ein Zeichen menschlicher Unwissenheit; es ist der Stoff, aus dem die Welt gemacht ist“. Es ist ein menschliches Bedürfnis, Vorhersagen über zukünftige Ereignisse und Entwicklungen in unserem Leben und in unserer Umwelt zu treffen, auch wenn es keine verlässliche Anhaltspunkte gibt. So vertrauen wir dem Wetterbericht,

obwohl wir wissen, dass das Wetter schlecht vorhersagbar ist und Wetterprognosen nicht selten falsch liegen.

Wenn wir wichtige Entscheidungen treffen müssen, können wir uns von richtigen Experten oder vermeintlichen Experten (Schamanen, Hellseher, Wahrsager) beraten oder von unserem Bauchgefühl leiten lassen. Wir nehmen manchmal Zuflucht zu diversen merkwürdigen Formen des Aberglaubens (Klopfen auf Holz, Aufhängen von Hufeisen) und Wahrsagemethoden, von denen aus wissenschaftlicher Sicht keine besser ist als die andere. Zu diesen Methoden zählen unter anderen das Kartenlesen (Tarotkarten), Handlinienlesen, die Befragung des „I Ging-Das Buch der Wandlungen“ oder von Horoskopern, das Werfen von Würfeln, Münzen, Nüssen oder das Ziehen von Strohhalmen. Auch die Interpretation von Mustern fällt in diese Kategorie (Teeblätter, Kaffeesatz, Wolken, Vogelflug und vieles mehr) (Yates 2024).

In der Antike waren Orakel sehr beliebt, die von Priestern oder Priesterinnen oft im Drogenrausch erstellt wurden (Niehaus & Wink, 2020). Die Orakel waren häufig aber so vage formuliert, dass sie in unterschiedlicher Weise interpretiert werden konnten. Ein Beispiel: Der lydische König Krösus soll das Delphische Orakel befragt haben, ob er sich gegen die Perser wehren solle. Das Orakel lautete: „Wenn du den Fluss überquerst, wirst du ein großes Reich zerstören“. Krösus betrachtete das Orakel als gutes Omen und zog 547 v. Chr. in den Krieg gegen die Perser. Das Orakel hatte insofern recht, dass ein großes Reich zerstört wurde – nur leider sein eigenes. Offensichtlich waren Orakel klugerweise mehrdeutig. Ein griechischer General erhielt vom Orakel von Dodona auf die Frage nach seinem Schicksal in einer bevorstehenden Schlacht die Auskunft „*Ibis redibis numquam per bella peribis*“. Je nachdem, in welchem Zusammenhang das Wort „*numquam*“ gesetzt wird, erhält man unterschiedliche Aussagen. Kommt der General in der Schlacht um, dann lautete die Übersetzung „Du wirst gehen und niemals zurückkehren, im Krieg wirst du umkommen“. Überlebte er jedoch die Schlacht, hätte man das Orakel als „Du wirst gehen, du wirst zurückkehren, niemals im Krieg wirst du umkommen“ deuten können (Yates, 2024).

Zu den beliebten Orakeltechniken der Antike gehörte das Interpretieren von Mustern in den Eingeweiden von Opfertieren (Haruspizien oder Auspizien). Die Eingeweideschau des Auguren Spurinna im Jahre 44 v. Chr. sagte dem römischen Kaiser Caesar voraus, dass er innerhalb der nächsten 30 Tage in Gefahr wäre; bekanntlich wurde Caesar am 15. März 44 von seinen Senatoren ermordet. Dies ist eins von tausenden Orakeln, die zufällig einmal stimmten. Die unzähligen Fälle, in denen sich Priesterinnen, Auguren, Schamanen oder weise Frauen irrten, wurden schnell vergessen. Alles was nicht stimmte, wurde ignoriert und die wenigen zufälligen Treffer häufig als Beweis dafür genommen, dass Orakel funktionieren; wissenschaftlich wird dieses Phänomen als *Reporting Bias* (selektives Berichten) und *Confirmation Bias*

(Bestätigungsfehler) bezeichnet, unter dem selbst die moderne Wissenschaft zu leiden hat (Stewart 2022; Yates 2024; Funke & Kruse, 2024).

Hier ein paar weitere Beispiele für falsche Prophezeiungen in der Weltgeschichte (Yates 2024): Die Azteken befürchteten, dass die Erde durch Erdbeben bald zerstört würde. Als Gegenmaßnahme brachten sie den Göttern Menschenopfer dar. Wie wir heute wissen, ging zwar das Aztekenreich unter, aber unsere Welt existiert noch heute. Zeremonien zur Besänftigung der Götter gab es nicht nur in der Neuen Welt, sondern sind vor allem aus der europäischen Antike bekannt. Homer berichtet regelmäßig von Stieropfern, die dem Gott Zeus von den Griechen erbracht wurden, um den Gott milde zu stimmen oder um Unheil abzuwenden.

Im Buch Daniel der Bibel (um 165 v. Chr.) steht die Prophezeiung, dass den Griechen eine katastrophale Strafe genau 1290 Tage später drohte, nachdem sie einen jüdischen Tempel geschändet hatten. Als nach 1290 Tagen nichts geschah, verlängerte man die Frist – mit demselben Ergebnis; es gab keine Strafaktion. Beliebt sind apokalyptische Vorhersagen für das Ende aller Tage (Keulemans 2010): Der Bischof **Hilarius von Poitiers** (um 315–367 n. Chr.) war nicht nur ein streitbarer Kirchenlehrer, sondern sagte das Weltende für das Jahr 365 vorher. Als dies doch nicht eintraf, datierte sein Schüler (der spätere Heilige Martin von Tours) den Weltuntergang auf das Jahr 400 n. Chr.. Sein Nachfolger Gregor von Tours war vorsichtiger und verlagerte ihn auf eine Zeit zwischen 799 und 806 n. Chr., also so weit in der Zukunft, als dass ihm eine falsche Prognose noch hätte schaden können.

Vor wenigen Jahrzehnten versuchte der evangelikale Prediger **Harold Camping** mit einer Vorhersage des Jüngsten Gerichts nicht nur seine Jünger zu schockieren, sondern auch kräftig Geld zu machen. Er postulierte zunächst den 6. Sept. 1994 als den Tag des Weltuntergangs; als nichts geschah, verwies er auf den 2. Okt. 1994. Man kann sich ja verrechnen; also nannte er nun den 21. Okt. 2011 als neuen Termin. In der Zwischenzeit erhielt er umfangreiche Spenden, um seine Weltuntergangsthese bekannter zu machen. H. Camping wurde 2011 mit dem satirischen Ig-Nobelpreis für Mathematik ausgezeichnet, den man für Postulate erhalten kann, die nicht reproduziert werden können.

Die Weltgeschichte kennt nicht nur religiöse oder politische Orakel, sondern auch das Zeitalter der Technologie kennt etliche markante Fehlprognosen. Als um 1830 das Eisenbahnzeitalter in Großbritannien begann, machte sich **Dionysius Lardner**, ein Mitglied der *Royal Society* mit der Prognose lächerlich, dass „Eisenbahnreisen mit hoher Geschwindigkeit unmöglich sind, weil die Passagiere keine Luft bekämen und ersticken würden“. Als **Henry Ford**, Gründer der *Ford Motor Company*, 1903 bei der *Michigan Savings Bank* um einen Kredit anfragte, erhielt er von deren Direktor die Prognose „Das Pferd wird bleiben, das Automobil hingegen ist nur eine Neuheit – eine

Modeerscheinung“. Ähnlich falsch lag **Steve Balmer** von Microsoft 2007 mit seine Prognose über die Zukunft des iPhones „Das iPhone hat keine Chance, einen nennenswerten Marktanteil zu erreichen. Keine Chance.“ Bekanntlich wurde das iPhone ein Erfolgsmodell der Konkurrenzfirma Apple.

Wenn Astrologen, Hellseher oder Wahrsager ihre Prognosen sehr exakt und konkret stellen, setzen sie sich der großen Gefahr aus, dass sie falsch liegen und als Scharlatane entlarvt werden. Um dies zu vermeiden, formulieren gewiefte Wahrsager ihre Prognosen nur so allgemein und vage, dass immer etwas stimmen kann; man denke an die wöchentlichen Horoskop-Prognosen in fast allen Printmedien, die von vielen (auch aufgeklärten) Menschen gelesen werden. Irgendwas stimmt bei den Aussagen immer oder schmeichelt unserem Selbstgefühl, und der naive Leser wird sich darin bestätigt sehen, dass Horoskope oder die Astrologie gar nicht so schlecht sein können. Berühmt sind die 942 Vorhersagen von **Nostradamus** (1503–1566), die nie geholfen haben, ein konkretes Ereignis vorherzusagen. Nostradamus (Michel de Notredame) war ein französischer Astrologe, Arzt und Apotheker. Nur im Nachhinein wurden Treffer unter den 4000 Zeilen vager Vorhersagen gefunden (man nennt dies den *Hindsight Bias* oder Rückschaufehler), die als Nachweis der seherischen Fähigkeiten von Nostradamus gelten; dabei wird übersehen, dass die meisten Prophezeiungen nie eintraten (Yates 2024).

Bei Vorhersagen muss man zwei Arten der Ungewissheit unterscheiden; da gibt es einmal die **alektorische Unsicherheit**, d.h. um Wahrscheinlichkeiten im Würfelspiel, und um die **epistemische Ungewissheit**, bei der es um das Wissen oder Wissenschaft geht (Stewart 2022; Yates 2024). Bei einem fairen rechteckigen Würfel ist die Wahrscheinlichkeit, eine bestimmte Zahl zu würfeln genau ein Sechstel, egal wie oft man es auch probiert; ebenso wie das Lotto zeichnet sich das Würfeln durch die alektorische Unsicherheit aus. Die epistemische Ungewissheit hängt dagegen vom jeweiligen Wissensstand bzw. Grad der Unwissenheit ab; z. B. ist die Erde eine Scheibe oder eine Kugel? Im alten Ägypten, Griechenland und anderen alten Zivilisationen glaubten auch viele Philosophen, dass die Erde eine flache Scheibe ist. Es dauerte bis ins Mittelalter, bis sich die Einsicht durchsetzte, dass die Erde eine Kugel ist. Durch die Weltumseglung durch Magellan konnte die Scheibenhypothese endgültig widerlegt werden (Yates 2024).

Vorhersagen können das Klima betreffen (Perioden mit Kälte, Hitze, Trockenheit oder Überschwemmungen), oder politische Entscheidungen (Wahlen, Krieg oder Frieden). Manchmal stimmen solche Vorhersagen, häufig jedoch nicht, weil die zugrundeliegenden Phänomene sich nicht wie angenommen so wie bisher oder linear entwickeln, sondern durch komplexe und chaotische Faktorennetzwerke oder Zufälle bedingt werden.

Es liegt wohl in der Natur von Prophezeiungen, dass die Versuchung groß ist, Vorhersagen möglichst drastisch zu formulieren, in dem eine Apokalypse heraufbeschworen wird. Meist sind solche **apokalyptischen Prophezeiungen** (Keulemans 2010) mit Handlungsanweisungen verbunden. In diesem Zusammenhang darf man nicht vergessen, dass unsere Medien weitgehend über Werbung finanziert werden. Ein Internet-Medium ist für die Werbung nur dann interessant, wenn ein Portal besonders hohe Klickzahlen erreicht. Bekannterweise ist dies der Fall, wenn über alarmistische Sensationen, Katastrophen, Unfälle oder Klatsch und Tratsch berichtet wird. In Politik, Psychologie und Soziologie sind Umfragen sehr beliebt; wenn die Stichproben groß genug und repräsentativ sind, können die Prognosen recht gut sein. Man kann Umfragen leider auch missbrauchen, in dem zu kleine oder selektive Stichproben erhoben werden; wer Soziale Medien oder Werbung kritisch verfolgt, kann sich dem Eindruck nicht erwehren, dass diese Manipulationen zugenommen haben.

Wir besitzen eine wichtige Eigenschaft, Muster in unsere chaotischen Umwelt zu erkennen. Das war in der Vergangenheit wichtig, um Feinde oder Beute rechtzeitig aufzuspüren. Besonders gut ausgeprägt ist unsere Fähigkeit, sich menschliche Gesichter und Gestalten zu merken, sowie deren Handlungsabsichten zu durchschauen. Diese angeborene Fähigkeit zur Mustererkennung, kann auch zu merkwürdigen Interpretationen führen. Manch einer möchte die Zukunft in den Mustern des Kaffeesatzes, im Vogelflug oder in Wolkenformationen erkennen. Wer kennt nicht Glückspieler, die aus Lotto- und Roulettezahlen todsichere Zahlenkombinationen berechnen, obwohl eigentlich jeder wissen müsste, dass es sich um aleatorische Unsicherheiten handelt? Aber auch ernsthafte Wissenschaftler können durch ihrem Instinkt für Mustererkennung fehlgeleitet werden. Viele Publikationen stellen einen Zusammenhang zwischen zwei Ereignissen her, auch wenn viele Korrelationen nicht kausal sind, sondern nur auf Mustern und Koinzidenzen in chaotischen Datenmengen beruhen (Yates 2024; Weiß 2024). Man denke an die Abnahme der Weißstörche in Mitteleuropa im 20. Jahrhundert und der gleichzeitigen Rückgang der Geburten der Menschen. Hier erkennt auch jeder Laie, dass es sich um eine zufällige Korrelation handelt und das Ursache und Wirkung nicht stimmen können; in vielen anderen Fällen sind die Zusammenhänge jedoch nicht so offensichtlich. Denken Sie an die vielen Studien, die uns in den Medien nahezu täglich über den vermeintlichen Zusammenhang spezieller Diäten mit Krankheiten oder Lebenserwartung serviert werden. Scheinkorrelationen, aber auch absichtliche Irreführung (Werbung) stehen ganz oben auf der Tagesordnung.

Trotz großer Fehleranfälligkeit solcher Prognosen benötigen wir sie im täglichen Leben. Wir möchten erfahren, wie sich das Wetter in den nächsten Tagen entwickelt, oder wo gerade Staus auf der Autobahn sind oder wo sie leicht entstehen können. Gerne würden wir wissen, wie sich Aktienkurse, die Volkswirtschaft, die Gesundheit oder die Nahrungsmittelproduktion zukünftig entwickeln werden, um rechtzeitig

Maßnahmen zu ergreifen. Wir sollten uns jedoch auch vor falschen Vorhersagen wappnen und versuchen, solche zu erkennen. Probleme bereiten uns die Phänomene wie Wahrscheinlichkeit und Nichtlinearität (Yates 2024). Die Mathematik und Wahrscheinlichkeitstheorie liefern uns erfreulicherweise Werkzeuge, um sie zu beurteilen und zu bewerten (s. Beitrag von Christel Weiß im vorliegenden Jahrbuch; Weiß 2024). Zum Glück sind wir nicht hilflos; unser Gehirn ist dahingehend optimiert worden, Fakten von Fiktionen und Wahrheit von Lüge zu unterscheiden; wir prüfen neue Information im Kontext des bekannten Wissen, manchmal auch instinktiv ohne Bezug zu den bekannten Fakten (Stewart 2022).

**Karl Popper** (190–1994) war ein wichtiger Philosoph und Wissenschaftstheoretiker. Es erkannte, dass es sich bei der wissenschaftlichen Forschung nicht darum geht, Wahrheiten oder Hypothesen zu bestätigen, sondern darum, falsifizierbare Hypothesen aufzustellen. Wird eine Hypothese widerlegt, so macht sie Raum für eine neue Hypothese. Dies ist die Grundlage jeder wissenschaftlichen Methode. Nur so bleibt die Wissenschaft erfolgreich. Kit Yates schreibt treffend „Wissenschaftliche Theorien sind nichts anderes als epistemische Vorhersagen über die Natur der Realität, die noch nicht widerlegt ist“. Sie gelten als besonders wertvoll, wenn Theorien konkrete Vorhersagen erlauben. In den Naturwissenschaften sind Experimente eine wichtige Methode, um Vorhersagen zu prüfen. Anders verhält sich der Glaube (Kulte, Religionen und Pseudoreligionen), der seinem Wesen nach unüberprüfbar ist; auch wenn wissenschaftliche oder empirische Fakten widersprechen, werden Gläubige am Glauben festhalten. In unserer modernen Zeit geht der Glaube an Gott und christliche Religionen zurück, stattdessen entstehen Pseudoreligionen (wie Ernährung, Klima, Weltanschauungen), in denen wir die Vokabeln der alten Religionen (sündigen, leugnen, Fegefeuer, Hölle oder ungläubig) benutzen. Die Poppersche Forderung nach der Falsifizierbarkeit von Hypothesen wird in den Diskussionen über eine gesunde Ernährung oder die zukünftige Entwicklung von Klima und Biodiversität leider häufig übersehen. Dies gilt auch für die vielen Modellierungen, denen wir täglich in den Medien und in wissenschaftlichen Aufsätzen begegnen. Viele sind nicht kaum falsifizierbar; das trifft vor allem auch für die vielen Informationen zu, die zunehmend über **Künstliche Intelligenz** (*Artificial Intelligence*, AI) generiert werden.

Auch wenn Informationen oder Vorhersagen über AI getroffen werden, können sie falsch sein – um diese zu beurteilen benötigen wir Menschen unsere **natürliche Intelligenz**. Wir können uns jedoch an einfachen Beispielen über die Fähigkeiten von AI selbst überzeugen, wenn wir moderne Navigationssysteme beim Autofahren benutzen. Wo man früher über Landkarten brütete, um den besten Weg zu finden, sind Navis in der Lage, Verkehrsdichte und Staus bei der Wahl der besten oder schnellsten Route zu berücksichtigen. Auch dies sind Prognosen, deren Qualität von der Aktualität und Präzision der Ausgangsdaten abhängt; solche Möglichkeiten hätte man vor 30 Jahren sicher noch als reine Fantasie abgetan.

Wir Menschen leben in der Illusion und Wunschvorstellung einer konstanten Welt und Umwelt. Treten Veränderungen auf, kommen wir am besten mit ihnen klar, wenn sie linear und im gleichbleibendem Tempo verlaufen. Wenn ein Input sich in bekannter Art und Weise ändert, kann man den Output relativ verlässlich vorhersagen. Leider verlaufen viele Prozesse in unserer Welt jedoch nicht linear, sondern exponentiell (z.B. Epidemien wie SARS-COV-2), reziprok oder quadratisch; viele sind sogar chaotisch, wie z.B. das Wetter und das Klima. Da helfen uns auch unser Bauchgefühl, übernatürliche Erklärungen oder instinktive Überlegungen nicht viel weiter, auch wenn sie manchmal zufällig richtige Prognosen produzieren. Koinzidenzen können uns leicht über Ursache und Wirkung täuschen. Komplexe Systeme können Unstetigkeiten, negative oder positive Rückkopplungsschleifen und zufällige Schwankungen aufweisen, die von mehreren unabhängigen Variablen beeinflusst werden. Machen wir in solchen chaotischen Systemen naive lineare Vorhersagen, so werden sie häufig daneben liegen. Dies kann die Entwicklung von Tierpopulationen, den Verlauf von Epidemien, genauso betreffen wie das Verhalten menschlicher Ansammlungen oder das Wetter (Hendry 2023; Yates 2024).

Nach diesen eher allgemeinen Erörterungen, warum Prognosen schwierig sind und häufig nicht eintreffen, wird es in den nachfolgenden Abschnitten um konkrete Beispiele aus Biologie und Umweltwissenschaften gehen.

## 2 Prognosen in Taxonomie und Evolutionsbiologie

**Carl von Linné** (1707–1778) war ein schwedischer Naturforscher und Arzt, der als erster ein konsistentes Ordnungssystem für alle Lebewesen aufstellte. Er gab jedem Organismus einen eigenen wissenschaftlichen Namen, um jede Art eindeutig zu klassifizieren. Linné erfand die **binäre Nomenklatur** und legte den Grundstein der bis heute geltenden Nomenklatur in *Species Plantarum* (1753) und *Systema Naturae* (1758). Die wissenschaftlichen Artnamen bestehen seit Linné aus einem Gattungsnamen und einem Artnamen, z.B. heißt die Nachtigall *Luscinia megarhynchos*, wobei *Luscinia* die Gattung und *megarhynchos* die Art definieren. Die Linnésche Nomenklatur war ein großer Fortschritt, da die bis dahin benutzten Trivialnamen meist nicht eindeutig waren und selbst innerhalb einer Sprache mehrere Trivialnamen für dieselbe Art existieren können.

Linné katalogisierte systematisch die im 18. Jahrhundert bekannten Pflanzen und Tiere. Durch Forschungsreisen in alle Regionen der Welt nahm die Anzahl der Arten ständig zu, so dass Linné mit jeder neuen Auflage der *Systema Naturae* neue Arten aufnehmen musste. Die 12. Auflage schrieb er zwischen 1766 und 1768. Linné wagte Prognosen über die Anzahl der zu erwartenden Tier- und Pflanzenarten. In seinem

Werk *Oeconomia naturae* schätzte Linné die Anzahl aller Pflanzenarten auf 10 000, Insektenarten auf 10 000, Amphibienarten auf 300 und Fische auf 2 000. Insgesamt kam er auf 26 500 Arten. Aktuell geht die Taxonomie von rund 400 000 Pflanzenarten (also 40 mal mehr als Linné annahm), ca. 1 Million Insektenarten, 8 600 Amphibienarten, über 20 000 Fischarten aus. Wie man sieht, muss man selbst die Prognosen von den besten Wissenschaftlern immer mit einer Prise Skepsis ansehen. Aber nicht immer ist eine Überprüfung von Prognosen so leicht, wie im Falle von Linné. Denn nach rund 270 Jahren haben wir einen ausreichend großen zeitlichen Abstand, um seine Prognosen überprüfen zu können.

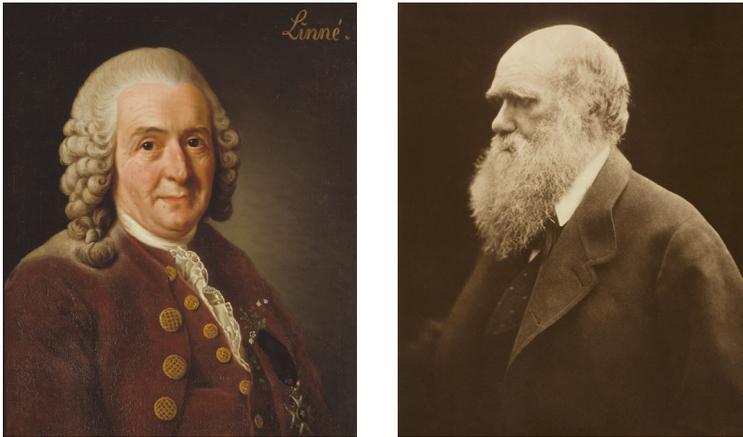


Abb. 1 Bedeutende Biologen. Carl von Linné und Charles Darwin (Quelle: Wikimedia)

**Charles Darwin** (1809–1882) zählt zu den großen Naturforschern, deren Theorien unser Verständnis über unsere Welt grundlegend veränderten. Darwin gilt als Begründer der **Evolutionstheorie**, über die wir die Entstehung der Arten erklären können. Darwin hatte erkannt, dass alle Arten innerhalb von Populationen eine bemerkenswerte Variabilität aufweisen. Wie wir heute wissen, entsteht die Variabilität vor allem durch die geschlechtliche Fortpflanzung, durch die das Erbgut der Eltern stark vermischt wird. Durch die „**Natürliche Selektion**“ überleben besonders diejenigen Individuen, die am besten an die jeweiligen Umweltbedingungen angepasst sind. Da gut angepasste Individuen meist mehr Nachkommen produzieren als schlechter angepasste Formen, entwickelten sich mit der Zeit besonders gut angepasste Linien. Darwin konnte dadurch klären, dass neue Arten nicht durch Schöpfung entstehen, wie man damals meist annahm, sondern aus bestehenden Arten, die im Verlauf der **Stammesgeschichte (Phylogenie)** durch die Natürliche Selektion modifiziert wurden.

Darwin publizierte die Evolutionstheorie 1859 in seinem Hauptwerk *On the Origin of Species* („Über die Entstehung der Arten“), die bis heute die Grundlage der modernen

Evolutionenbiologie darstellt. Zu Darwins Zeiten waren Genetik und DNA-Forschung noch unbekannt. Diese neuen Disziplinen haben die Evolutionstheorie erweitert, aber nicht infrage gestellt, dies wäre ein Beispiel einer Vorhersage, die Bestand hatte.

Charles Darwin schrieb am 26.9.1857 an seinen Freund T. H. Huxley: „*In regard to Classification, & all the endless disputes about the Natural System which no two authors define in same way, I believe it ought, in accordance to my heterodox notions, to be simply genealogical. But as we have no written pedigrees, you will, perhaps, say this will not help much; but I think it ultimately will, whenever heterodoxy becomes orthodoxy, for it will clear away an immense amount of rubbish about the value of characters & – will make the difference between analogy & homology, clear. The time will come I believe, though I shall not live to see it, when we shall have very fairly true genealogical trees of each great kingdom of nature.*“ Es hat rund 150 Jahre gedauert, bis diese Prognose Darwins Realität wurde, dass wir für Tiere und Pflanzen verlässliche Stammbäume, also ein Natürliches System erstellen können, welche die evolutionäre Stammesgeschichte widerspiegeln. Die neuen Stammbäume beruhen im Wesentlichen auf Sequenzanalysen der DNA, in der die evolutionäre Vergangenheit verborgen ist (Storch et al. 2013; Wink 2021). Dies sind also die „*written pedigrees*“, von den Darwin annahm, dass sie nicht existieren würden. DNA-Analysen haben auch die von Darwin benannten Probleme der „*value of characters*“ und Analogie/Homologie gelöst.

Charles Darwin war ein neugieriger Beobachter und versuchte, biologische Phänomene und Anpassungen zu verstehen. Bei seinen Untersuchungen stieß er auf eine bemerkenswerte Orchidee, die epiphytisch an der Ostküste von Madagaskar vorkommt. Diese Orchidee, die Darwin als kultivierte Pflanzen in England vorfand, weist einen bis 45 cm langen Lippensporn auf, in dessen unteren Abschnitt sich Nektar befindet. Blütenpflanzen locken bekanntlich bestäubende Insekten durch Blütenfarben und Duftstoffe an und belohnen sie mit zuckerreichem Nektar. Darwin stellte Überlegungen an, welches Insekt in der Lage sein könnte, den so tief versteckten Nektar zu erreichen. Er schrieb „*Good heavens what insect can suck it!*“. Darwin postulierte, dass es auf Madagaskar einen Schwärmer mit einem besonders langen Saugrüssel geben müsste. Einen solchen Schwärmer fanden Entomologen tatsächlich 1903 auf Madagaskar. Dieser Schwärmer kommt auch in Afrika vor, hat aber auf Madagaskar vor rund 7 Millionen Jahren eine eigene Unterart gebildet, die als *Xanthopan morgani praedicta* beschrieben wurde. Der Name der Unterart „*praedicta*“ erinnert daran, dass Darwin ihr Vorkommen über 40 Jahre vorher postuliert hatte. Aber erst 1997 konnte gefilmt werden, wie dieser Schwärmer es schafft, den Nektar aus dieser Orchidee, die im Deutschen als Sternorchidee und im Englischen als Darwin's orchid (*Angraecum sesquipedale*) bezeichnet wird, zu saugen – ein bemerkenswerter Fall von Ko-Evolution (Netz & Renner, 2017).

### 3 Vorhersagen in den Umweltwissenschaften

#### 3.1 Prognosen des *Club of Rome*

Wichtige Zukunftsprognosen stammen von dem amerikanischen Biologen **Paul Ehrlich** (\*1932), der an der Stanford-Universität lehrte. Obwohl er ein Entomologe war, interessierte er sich schon früh für Umweltthemen und das menschliche Bevölkerungswachstum. Sein wichtigstes Buch war die *Population Bomb* (1968) (deutsch „Die Bevölkerungsbombe“ 1971), in dem er mit Recht auf die Gefahren und negativen Auswirkungen der zunehmenden Überbevölkerung hinwies. Denn die Zunahme der menschlichen Population hat und hatte gravierende Einflüsse auf die Umwelt. Man denke an die kontinuierliche Vernichtung der tropischen Wälder, an die Zerstörung von Feuchtgebieten oder kleinflächigen Kulturlandschaften, sowie das rasante Wachstum der Städte (Entstehung der *Mega-Cities*), der modernen Landwirtschaft, von Industrieanlagen oder Verkehrswegen sowie Ressourcenverbrauch und Umweltverschmutzung.

Ehrlich machte auch diverse Prognosen, die sich zum Glück als weitgehend falsch erwiesen. So nahm er an, dass die Sterberate in den 1970er und teilweise 1980er Jahren aufgrund des exponentiellen Bevölkerungswachstums dramatisch ansteigen würde, weil gravierende Hungerkatastrophen zu erwarten wären. Es gab lokale Hungersnöte, doch keinen weltweiten Hunger oder keinen Anstieg in der Sterberate, die global von 13 pro 1000 Menschen in den 1960er Jahren auf 9 pro 1000 Menschen zwischen 2005 und 2010 abnahm. Ehrlich hatte die Erfolge der **Grünen Revolution** nicht vorhergesehen, die zu einer substantiellen Steigerung in den Erträgen der wichtigsten Nahrungspflanzen führte. Lokale Hungersnöte konnten zudem meist durch eine Nahrungsmittelversorgung aus anderen Ländern gemildert oder abgefangen werden. Ehrlich (1968) lag auch komplett falsch mit seiner Prophezeiung über die Zukunft der Britischen Inseln: „*By the year 2000, the United Kingdom will be simply a small group of impoverished islands, inhabited by some 70 million hungry people.*“

Ein Meilenstein in der Diskussion über das Bevölkerungswachstum und die daraus resultierende Verknappung aller Ressourcen (Umwelt, Nahrung, Rohstoffe) war der vom *Club of Rome* (ein informeller Zusammenschluss von über 70 Wissenschaftlern) 1972 erarbeitete Bericht, der die Umweltdiskussion bis heute stark beeinflusst. **Dennis Meadows** und Kolleginnen waren die Autoren von „*The Limits to Growth. A Report for the Club of Rome’s Project on the Predicament of Mankind*“, der im selben Jahr auch in der Deutschen Ausgabe „Die Grenzen des Wachstums. Bericht des *Club of Rome* zur Lage der Menschheit“ erschien. Die Autoren untersuchten den Zustand des Bevölkerungswachstums und Ernährung, der Industrialisierung, Rohstoffreserven und Umwelterstörung und machten Vorhersagen zu deren Entwicklung in den nächsten 30 bis 100 Jahren.

Ein zentrales Anliegen war der Hinweis auf die Gefahren des exponentiellen Wachstums der meisten Parameter; denn um dessen Auswirkungen zu meistern, muss man rechtzeitig Maßnahmen ergreifen, bevor es zu spät ist.

Basis für die Vorhersagen waren Computersimulationen (Computermodell World3), die damals gerade möglich geworden waren, wobei unterschiedliche Szenarien durchmodelliert wurden. Seitdem sind Modellierungen zu einem mächtigen Instrument für Vorhersagen geworden. Man darf jedoch nicht vergessen, dass Simulationen und Modellierungen immer nur Hypothesen darstellen können und nur so gut sind wie die zugrundeliegenden Ausgangsdaten sowie den eingesetzten Algorithmen. Bei den heute in den Umweltwissenschaften, Ökologie und Epidemiologie sehr beliebten Modellierungen können bereits kleine Änderungen der Ausgangsparameter zu deutlich unterschiedlichen Ergebnissen führen. Bei jeder Modellierung gibt es daher mehr als eine Realisierung. Da häufig nur die Ergebnisse derjenigen Modellierung gezeigt werden, die das jeweilige Autorenteam für am wahrscheinlichsten oder erwünscht hält, leiden Modellierungen häufig, – obwohl sie nach exakten Algorithmen funktionieren, – an einem erheblichen Maß an Subjektivität und sind anfällig für Manipulationen.

Die Autoren der „Grenzen des Wachstums“ entwarfen ein Weltmodell, in dem die Weltbevölkerung und Industrialisierung exponentiell wachsen; infolgedessen würden Nahrungsreserven und andere Rohstoffe knapp werden, während die Umweltverschmutzung zunimmt. Die zentrale Aussage des Berichts lautete „Wenn die gegenwärtige Zunahme der Weltbevölkerung, der Industrialisierung, der Umweltverschmutzung, der Nahrungsmittelproduktion und der Ausbeutung von natürlichen Rohstoffen unverändert anhält, werden die absoluten Wachstumsgrenzen auf der Erde im Laufe der nächsten hundert Jahre erreicht.“ Seitdem „Die Grenzen des Wachstums“ publiziert wurden, erfolgten Fortschreibungen des *Club of Rome*. Von größerer Bedeutung war der Bericht der US-Regierung „Global 2000 – Der Bericht an den Präsidenten“, der nicht nur in großer Ausführlichkeit die ursprünglichen Themen erörterte, sondern für viele weitere Umweltthemen Analysen und Prognosen erstellte.

Der *Club of Rome* oder die Autoren von Global 2000 haben viele Umweltprobleme richtig erkannt und bewertet; ihre Aussagen sind daher auch heute noch grundsätzlich relevant. Wie zu erwarten, sind viele Prognosen des *Club of Rome* oder Global 2000 eingetroffen, viele andere haben sich entweder als zu kurzfristig erwiesen oder haben die Fortschritte der Wissenschaft, Medizin, Landwirtschaft und Technik nicht richtig antizipiert. Viele Statements wurden von den Medien unkritisch aufgegriffen und nicht selten dramatisiert. Alarmistische und apokalyptische Szenarien, die sich auf Prognosen des *Club of Rome* oder Global 2000 berufen, prägen die Umweltberichterstattung bis heute.

### 3.2 Umweltveränderungen und Bestandsrückgänge

**Rachel L. Carson** (\*1907–1964) war eine amerikanische Biologin und Sachbuchautorin, die 1962 mit ihrem Hauptwerk „*The Silent Spring*“ (Der stumme Frühling) weltweit bekannt wurde. Sie schrieb dieses Buch, als sie an Brustkrebs erkrankt war, an dem sie 1964 verstarb. Dieses Buch kann als Meilenstein der Umweltbewegung angesehen werden.

Als Biologin hatte Rachel Carson den großflächigen Einsatz von **Pestiziden** in Nordamerika nach dem 2. Weltkrieg und seine negativen Auswirkungen erlebt. Bei den Pestiziden handelte es sich hauptsächlich um umweltbelastende Insektizide, so z. B. Chlorkohlenwasserstoffe wie DDT (u. a. zur Malariabekämpfung eingesetzt), Dieldrin, Aldrin und Heptachlor, die auch Böden und Wasser kontaminieren und sich letztlich in allen Lebewesen einer Nahrungskette anreichern, u. a. in Bodenlebewesen, Vögeln, Haustieren und Menschen und dort zu Schäden führen können. Rachel Carson stellte die Prognose auf, dass eine weitere intensive Ausbringung der toxischen Pestizide zu einer massiven Verschlechterung der Lebensbedingungen für Mensch und Tier und letztlich zur massiven Reduzierung der Bestände wildlebender Tiere führen würde. Der Titel des Buches war daher treffend gewählt. Diese Prognose war leider grundsätzlich richtig, auch wenn die Landwirtschaft heute weniger toxische Pestizide verwendet.

DDT und andere Chlorkohlenwasserstoffe sind für Insekten und viele andere Evertebraten direkt toxisch, weniger jedoch für Säugetiere und Vögel, die zunächst durch Nahrungsmangel betroffen sind. In den 1950er und 1960er Jahren beobachteten Ornithologen, dass bei Greifvögeln (Seeadler, Fischadler, Wanderfalke) und Seevögeln (Pelikane) (Abb. 2) in Nordamerika und Europa der Bruterfolg ausblieb. Die Ursache wurde bald entdeckt: Die Greifvögel legten zwar genauso viele Eier wie früher, jedoch waren die Eischalen so dünn, dass sie beim Bebrüten zerbrachen. Es konnte dann experimentell gezeigt werden, dass DDT für die Verdünnung der Eischalen verantwortlich ist. Diese Beobachtungen und das Buch von Carson führten letztlich zum Verbot von DDT in Nordamerika und in Europa.

Da DDT und verwandte Verbindungen lange in der Umwelt persistieren, dauert es fast ein Jahrzehnt, bis sich eine Verbesserung bei den Greifvögeln und Seevögeln einstellten. Damals war ich ein junger Vogelkundler und alle älteren Kollegen sagten mir, ich solle die wenigen Fischadler, Wanderfalken und Uhus, die es in den 1960er Jahren noch gab, nur gut ansehen, denn sie würden bald in Deutschland ausgestorben sein. Zum Glück lagen sie mit dieser Prognose daneben: Naturschützer unternahmen große Anstrengungen, um die bedrohten Großvögel zu retten. Neben Verbot der Bejagung und Horstbewachung wurden umfangreiche Nachzuchten mit pestizidfreier Nahrung durchgeführt, die danach in der Natur ausgewildert wurden. Diese Maßnahmen und der Rückgang der Chlorkohlenwasserstoffe führten erfreulicherweise dazu, dass sich die Bestände erholten. Heute kann man Adler, Milane und Wanderfalken vielerorts



**Abb. 2** Vogelarten, die durch DDT vom Aussterben bedroht waren, deren Bestände sich aber wieder erholt haben. 1. Wanderfalke, 2. Uhu, 3. Fischadler, 4. Braunpelikan (Fotos: M. Wink)

nachweisen; ihre Bestände liegen derzeit häufig höher als zu Beginn des 20. Jahrhunderts, als noch keine synthetischen Pestizide eingesetzt wurden.

Da es seit dem 2. Weltkrieg überall zu einer Intensivierung der Landwirtschaft kam, wurden viele natürliche Lebensräume (Moore, Feuchtwiesen, Feuchtgebiete, Heiden, Feldhecken, Feldgehölze und Wälder) geschädigt oder zerstört, indem störende Elemente entfernt wurden. Nur so konnte die industrielle Landwirtschaft großflächig ökonomisch arbeiten. Da zunehmend Monokulturen angebaut wurden und Kulturpflanzen generell einen Pflanzenschutz benötigen (Storch et al., 2013), kam es zu einer Intensivierung des chemischen Pflanzenschutzes. Auch wenn die Prüfung von Pflanzenschutzmitteln besser geworden ist, sind viele Mittel im Einsatz, die die Umwelt schädigen.

**Herbizide** werden ausgebracht, um die Entwicklung von „Unkräutern“ zu verhindern. Auch wenn sie für Tiere nicht toxisch sind, führen sie zu einem ökologischen Schaden, da viele „Unkräuter“ als Samenproduzenten für Körnerfresser oder als Nahrungspflanzen für Insekten essentiell sind. Fehlt die pflanzliche Nahrung in der Feldflur, dann geht es den samen- und insektenfressenden Tieren (z. B. viele Singvögel,

Rebhuhn) schlecht. Parallel wurden neue hocheffiziente **Insektizide** entwickelt (wie Neonicotinoide), die den Schadinsekten, aber auch allen anderen Insekten den Garaus machen. Es ist daher nicht überraschend, dass die Insektenbestände in Europa um 70–80 % in den letzten Jahrzehnten zurückgingen. Schon früh haben Ökologen auf diese Probleme hingewiesen und richtig prophezeit, dass es zu gravierenden Rückgängen bei den insektenfressenden Tieren der landwirtschaftlichen Nutzflächen kommen wird. Diese Prognosen haben sich leider bewahrheitet, nicht nur bei uns in Europa, sondern auch in Nordamerika und eigentlich global überall dort, wo industrielle Landwirtschaft betrieben wird.

Wie bei allen Umweltphänomenen muss man bei spezifischen Prognosen vorsichtig sein. Als nach 1968 die Bestände der Dorngrasmücke (*Curruca communis*) in Europa zusammenbrachen, konnte man besorgte Publikationen lesen: Winstanley et al. (1974) fragten „*Where have all the whitethroats gone?*“ Man nahm an, dass eine Dürre in der Sahelzone, die Intensivierung der Landwirtschaft und der Pestizideinsatz für die Rückgänge verantwortlich sein müssten. Auch renommierte deutsche Ornithologen wie Peter Berthold prophezeiten ein Aussterben der Dorngrasmücke, was zum Glück nicht eintraf. In den 1980er und 1990er Jahren erholten sich die Bestände; aktuell gehören Dorngrasmücken wieder zu den weitverbreiteten Insektenfressern in Mitteleuropa. Offenbar hatten wir weder die Ursachen des Rückgangs noch die Resilienz dieser Vogelart verstanden.

Ein weiteres Beispiel für verfrühte Prognosen und Resilienz einer Vogelart: Im Sommer 2011 kam es in Nordbaden zu einem auffälligen Sterben der Amsel (*Turdus merula*). Als Ursache konnte schnell eine Infektion mit einem Virus (Usutu-Virus; USUV) nachgewiesen werden, das Amseln und andere Vögel in kurzer Zeit dahinraffte. USUV, das von der Stechmücke *Culex pipiens* übertragen wird, stammt ursprünglich aus Afrika und wurde ab 2001 in Europa nachgewiesen. USUV breitete sich ab 2011 schnell in Deutschland aus, so dass Amseln überall selten wurden (Wink 2014). Auch in diesem Falle prophezeiten viele Biologen, dass Amseln wohl bald zu den aussterbenden Vogelarten zählen würden. Diese Vorhersage traf zum Glück nicht ein; die Amselbestände erholten sich und heute haben wir in Nordbaden mindestens so viele, wenn nicht mehr Amseln als vor der Epidemie.

### 3.3 Biodiversitätsrückgang und Artensterben

Unter Biodiversität verstehen wir die Anzahl aller beschriebenen Arten in einem definierten Lebensraum. Dies sind global rund 10 000 Prokaryotenarten (Bakterien, Archaeobakterien), ca. 400 000 Pflanzenarten (Sporen- und Samenpflanzen) und ca. 1,6 Millionen Tierarten (darunter mehr als 1,5 Millionen Arten Wirbellose (Evertebraten).

Nur 65 000 Vertebratenarten sind beschrieben, darunter fast 11 000 Vogelarten (Chapman 2009; Storch et al., 2013). Wie bereits früher erwähnt, glaubte Linné, schon fast alle Arten zu kennen; durch die Arbeit der Taxonomen wächst die Zahl der beschriebenen Arten langsam aber stetig. Folgt man den Medien oder den Mittelungen einschlägiger NGOs so finden wir die Angabe deutlich größerer Artenzahlen auf der Erde, die zwischen 8 und 100 Millionen schwanken können. Dabei handelt es sich aber um reine Hochrechnungen und Schätzungen; was meist nicht erwähnt wird. Zugegeben, unter den Insekten, Würmern und Bewohnern der Tiefsee dürfte es noch viele unbekannte Arten geben. Dagegen ist es eher unwahrscheinlich, dass noch sehr viele Samenpflanzen, Vögel, Säugetiere, Reptilien und Amphibien unbekannt sind; ich wage einmal die Schätzung, dass bei diesen Organismen die Zahl der unbekanntarten in der Größenordnung von 10–20 % liegt (Storch et al., 2013). Vor allem durch DNA-Analysen werden bekannte Vertebraten in neue Arten aufgespalten, aber nur in seltenen Fällen gänzlich neue unbekannte Arten oder Unterarten erkannt und beschrieben (Storch et al., 2013; Wink 2020, 2021).

Wenn wir Prognosen darüber machen möchten, wie viele Arten schon ausgestorben sind und vom Aussterben bedroht sind, benötigen wir harte Fakten. Selbst im IPBES Bericht 2019 wird die Behauptung aufgestellt, dass 1 Million Arten akut vom Aussterben bedroht wären. Die Autoren des Berichts gehen jedoch nicht von den der Wissenschaft bekannten Arten aus, sondern machen eine Extrapolation auf eine hochgerechnete Anzahl von 8 bis 9 Millionen Arten (Sweetlove 2011). Ferner wird medial (z.B. WWF) vielfach behauptet, dass wir uns bereits im Anthropozän und im Zeitalter des sechsten Massenaussterbens der Erdgeschichte befänden und dass täglich zwischen 70 und 150 Arten aussterben würden. Wie entstehen solche Hochrechnungen und Prognosen, deren wissenschaftliche Basis dünn, wenn nicht sogar zweifelhaft ist?

Wie viele Arten sind denn nachweislich ausgestorben? Biologen kennen rund 800 Arten, die seit 1500 nachweislich verschwunden sind, darunter 135 Vogel- und 76 Säugetierarten. Zwischen 1900 und 2007 starben nur 1 Vogelart (Wandertaube) und 3 Säugetierarten aus. Das uns bekannte Artensterben fand also hauptsächlich zwischen 1500 und 1900 statt. Unter den ausgestorbenen Wirbeltierarten finden wir viele Inselendemiten mit sehr kleinen Populationen (also Arten, die nur auf einer einzigen Insel vorkommen). Die Biodiversität auf isolierten Inseln ist sehr gefährdet, da sich dort Bejagung (Dronte, Riesenalk), Lebensraumverlust und vor allem die Freisetzung von Ratten, Katzen und Schlangen katastrophal auswirken (Wink 2014, 2020), die leicht zum Erlöschen einer endemischen Art führen können.

Wie lässt sich die offensichtliche Diskrepanz zwischen den Medienberichten und den Fakten erklären? Der Ökologe Terry Erwin führte 1982 ein wichtiges Experiment mit einigen tropischen Bäumen in Panama durch, die er mit einem Insektizid begaste und damit alle Insekten abtötete. Dann sammelte er alle toten Insekten ein und

ermittelte alle Käfer-Arten, die auf einem einzelnen Baum lebten. Er stellte die Hypothese auf, dass auf jeder tropischen Baumart ca. 1200 Käferarten leben würden. Unter der Annahme von 50 000 Arten von tropischen Bäumen ergab seine Hochrechnung eine Zahl von mindestens 60 Millionen Käferarten. Da rund 30 % aller Tierarten zu den Käfern zählen, ergibt sich eine Artenzahl von mindestens 180 Millionen Arten (Wink 2020). Bekanntlich werden täglich etliche Quadratkilometer der tropischen Regenwälder in Asien, Afrika und Amerika abgeholzt oder verbrannt. Es besteht also die Möglichkeit, dass wöchentlich etliche tropische Baumarten und damit die zugehörigen Insekten für immer aussterben. Aus meiner Sicht ist diese Annahme wissenschaftlich unbewiesen und vermutlich falsch.

Mit großer Wahrscheinlichkeit erleben wir aktuell (noch?) kein Massenaussterben, vor allem nicht in Eurasien und in Nord- und Mittelamerika, auch wenn diese mediale Alarmmeldung regelmäßig Schlagzeilen macht. Evident sind jedoch gravierende Probleme für die Biodiversität: Weltweit stellen Biologen merkliche Rückgänge in der Bestandsgröße vieler Arten fest. Man hat geschätzt, dass Vogelbestände in den letzten 3–4 Jahrzehnten Rückgänge um ca. 3 Milliarden Vögel in Nordamerika und um 421 Millionen Individuen in Europa zurückgingen (Wink 2020). Wenn diese Rückgänge nur lange genug anhalten, wird es sicher auch in absehbarer Zeit zu einem realen Aussterben von früher weit verbreiteten Arten kommen. In dieser Annahme liegen die Alarmmeldungen sicher richtig. Wie schon erwähnt, ging die Biomasse an Insekten in Deutschland um 60–80 % (Hallmann et al., 2017; Habel et al., 2019; Seibold et al., 2019) in den letzten Jahrzehnten zurück, was natürlich negative Auswirkungen auf die Bestände von insektenfressenden Vögeln, Fledermäusen oder Igel hatte.

### 3.4 Neophyten und Neozoen

Jedes Jahr gelangen immer mehr nichtheimische Tiere, Pflanzen, aber auch Bakterien, Pilze und Viren zu uns. Mehrere Taxa wurden absichtlich nach Europa eingeführt, weil sie als Heimtiere oder als Zierpflanzen, sowie in der Land- oder Forstwirtschaft verwendet werden. Andere gebietsfremde Arten gelangen versteckt über den Boden, das Wasser, Lebensmittel oder über Flugzeuge und Schiffe (Ballastwasser) zu uns. Aufgrund des zunehmenden Welthandels und der globalen Transportwege werden solche Ereignisse in Zukunft noch häufiger vorkommen. Wie schnell diese globalen Transportnetze funktionieren, zeigt die rasche Ausbreitung von SARS-COV-2, das Virus, das die jüngste Corona-Pandemie verursacht hat. Die meisten der Neuankömmlinge können sich bei uns nicht ansiedeln und verschwinden. In mehreren Fällen sind diese Neuankömmlinge in die freie Natur entkommen und konnten sich dort etablieren. Einige von ihnen sind eine willkommene Bereicherung für die lokale Fauna und Flora.

Viele andere jedoch, insbesondere die invasiven Arten und Tiere, die als Vektoren für Krankheiten fungieren (z.B. Tigermücke), können der Umwelt, uns Menschen und der Artenvielfalt schaden (Goodenough 2010). Wie bereits oben erwähnt, hat vor allem auf Inseln die Einführung von Hunden, Katzen, Ratten, Mäusen oder Schlangen sogar zum Aussterben der lokalen endemischen Fauna geführt.



**Abb. 3** Beispiele für Gefangenschaftsflüchtlinge, die sich erfolgreich in Mitteleuropa angesiedelt haben. 1. Halsbandsittich, 2. Nilgans. Beide Arten werden manchmal als invasiv und schädlich angesehen, obwohl sie unsere Biodiversität bereichern und nicht schädlich sind. (Fotos: M. Wink)

Bei den Prognosen über den Einfluss von eingeführten Arten in der Ökologie und im Naturschutz sollten wir jede gebietsfremde Art einzeln unter die Lupe nehmen und nicht pauschal und oberflächlich argumentieren (Abb. 3). Wenn eine neue Art eindeutig schädlich ist, sollten wir versuchen, sie so früh wie möglich zu beseitigen. Arten, die der einheimischen Flora und Fauna nicht schaden, sollten jedoch als interessante Ergänzungen betrachtet werden, da die einheimische Artenvielfalt in den meisten Regionen der Welt zurückgeht (Goodenough 2010; Pearce 2015). In Fachartikeln und in den Medien wird mit der Frage meist unkritisch umgegangen und postuliert, dass die Neophyten und Neozoen für die oben beschriebenen Bestandsrückgänge vieler Arten verantwortlich wären – dies dürfte in den meisten Fällen (bis auf Pathogene) keine valide Vorhersage sein.

Aus wissenschaftlicher Sicht könnte es spannend sein zu untersuchen, was diese erfolgreichen Neankömmlinge dazu befähigt, in unserer industrialisierten Welt so gut zu überleben, z. B. schnelles Wachstum, rasche Fortpflanzung, hohe

Ausbreitungsfähigkeit, phänotypische Plastizität, ökologische Kompetenz, generalistische Lebensweise oder Assoziationen mit Menschen (Goodenough 2010).

### 3.5 Wetter- und Klimavorhersagen

Schon in der Antike um 650 BC versuchten die Babylonier das Wetter vorherzusagen, indem sie Wolkenmuster und Wolkenbewegungen beobachteten. Der Philosoph und Naturforscher **Aristoteles** (384–322 v. Chr.) diskutierte in seinem Werk *Meteorologica*, wie Regen, Hagel, Schnee, Stürme und Gewitter entstehen könnten. Da Aristoteles ein sehr guter und gewissenhafter Beobachter war, lag er mit einigen seiner Schlussfolgerungen richtig.

Exakte Wetteraufzeichnungen gibt es seit dem 18. Jahrhundert, aber erst 1859 gab der *Meteorological Service (the Met Office)* in Großbritannien erste Wettervorhersagen für die Schifffahrt und ab 1861 für die Allgemeinheit heraus. Durch Auswertung vieler Messstationen, vor allem durch Messungen der Umweltsatelliten und rechnerbasierte Modellierungen können Meteorologen seit rund 50 Jahren immer bessere Wettervorhersagen treffen. Heute sind 4-Tages-Vorhersagen so gut und genau wie 1-Tagesvorhersagen vor 30 Jahren. Bezogen auf einen 3- oder 5-Tageszeitraum treffen die meisten Prognosen mit 80 bis 97 % Genauigkeit zu. Vorhersagen für 7 Tage haben eine Eintreffwahrscheinlichkeit von 60 bis 70 %, die von 10 Tagen jedoch nur noch von 30 bis 40 % (Alley et al. 2020; Ritchie 2024). Je präziser und lokaler die Wetterprognosen sind, desto höher ist aber auch die Fehlerrate, da das Wetter ein chaotisches System darstellt, dessen Variablen immer noch nicht alle verstanden und messbar sind.

Klimatologen machen jedoch häufig Prognosen für die Veränderung des Klimas (also der Summation der Wetterereignisse) auf einem Kontinent oder sogar der Erde, die Zeiträume von 50 und mehr Jahren betreffen. Selbst das *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) äußerte sich im Jahre 2001 noch kritisch zu den **Langfristprognosen** „*The climate system is a coupled non-linear chaotic system, and therefore the long-term prediction of future climate states is impossible*“. In den aktuellen Dokumenten des IPCC fehlt diese wichtige Aussage jedoch inzwischen. Da schon Wettervorhersagen für 10 Tage schwierig sind, stellt sich die Frage nach der Validität solcher langfristigen Prognosen, die ja zudem kaum jemand überprüfen kann (also im Sinne von Popper kaum falsifizierbar sind). Jedoch gibt es solche Klimaprognosen nicht erst seit heute, sondern schon seit vielen Jahrzehnten. In vielen Fällen können wir daher heute selbst prüfen, ob die Forscher früher mit ihren Prognosen zum Klima und zu Umweltveränderungen richtig lagen. Dazu führe ich aus einer großen Sammlung von Einzelbeispielen nachfolgend einige ausgewählte Prognosen an.

James P. Lodge vom renommierten *National Center for Atmospheric Research* in Boulder publizierte 1970 die Hypothese, dass die Luftverschmutzung durch Aerosole die Sonneneinstrahlung so stark schwächen würde, dass im ersten Drittel des 21. Jahrhunderts eine **neue Eiszeit** auftreten müsste. Diese Prognose wurden von zwei Wissenschaftlern der NASA (Rasool & Schneider, 1971) grundsätzlich mit einer Publikation in der renommierten Wissenschaftszeitschrift *Science* 1971 bekräftigt. Anfang der 1970er Jahre gab es außerordentlich kühle Frühjahre, Dürren in Afrika, Rekordregen in Pakistan, Japan und USA und Zunahmen der Areale mit Eis und Schnee um 11%. Damals wurde von den Medien die Angst vor der nächsten Eiszeit mit instabilem Wetter, Ernteaussfällen und vielen Toten verbreitet, die aber relativ bald von der Angst vor der aktuell zu beobachtbaren **Klimaerwärmung** abgelöst wurde.

Wenn immer es einen schneearmen Winter gibt, findet man in den Medien vermehrt Prognosen, dass es bald überhaupt keinen Schnee mehr geben und dass der Wintersport bald unmöglich sein würde. Als die Olympischen Winterspiele von 2014 in Sochi ausgetragen wurden, waren viele Ski-Rennen nur möglich, indem die Loipen und Abfahrthänge mit künstlichem Schnee präpariert wurden. In der „*The New York Times*“ prognostizierte Porter Fox am 7. Februar 2014, dass Schnee ein Thema der Vergangenheit wäre und dass es zukünftig kaum noch Winter gäbe, in denen Wintersport möglich wäre. Ähnlich äußerten sich auch viele andere Medien weltweit. In den Wintern 2022/23 und 2023/24 gab es in Asien, Europa und Nordamerika jedoch wieder sehr viel Schnee, sodass der Wintersport boomte und noch vielerorts bis weit in den Frühling möglich war. In derselben „*The New York Times*“ veröffentlichte David Goodman am 20. März, 2023 einen Artikel mit der Überschrift „*The ski season that just won't quit*“. So plausibel die These vom Rückgang vom Schnee auch erscheint, wenn sich das Klima global erwärmt, so können Prognosen jedoch leicht daneben liegen, da Trends nicht linear sind und Klima nicht gleich Wetter ist.

**Al Gore** (\*1948), ein amerikanischer Politiker, Umwelt-Aktivist und Friedensnobelpreisträger (2007) hat bereits viele Prognosen zum Klimawandel und seinen Auswirkungen abgegeben, die aber meist nicht eingetreten sind. So postulierte er im Jahre 2005, dass die Schneebedeckung des Gipfel des Kilimanjaro in Ostafrika bis 2015 komplett verschwinden würde. Dies ist zum Glück nicht eingetroffen; bis heute weist der Kilimanjaro Schneehöhen von über 2 Metern auf. In *Forbes* erschien am 15.01.2018 ein Artikel von Jeff McMahon über die Zukunft des arktischen Eises. Er zitiert darin James Anderson, einen Professor für Atmosphärenchemie der Harvard Universität, der an der Entdeckung des Ozonlochs beteiligt war: „*The chance that there will be any permanent ice left in the Arctic after 2022 is essentially zero, with 75 to 80 percent of permanent ice having melted already in the last 35 years.*“ Schon 2007 berichtete die Welt am 13.12.2007, dass internationale Klimaforscher der NASA z.B. Jay Zwally postulierten, dass die Arktis bereits im Sommer 2012 eisfrei sein sollte.

Ähnlich lautende Alarmmeldungen erschienen und erscheinen regelmäßig in allen Medien, sowohl in *Social Media* als auch in seriösen Zeitschriften. Aktuell 6 bzw. 17 Jahre später ist das Eis der Arktis nicht verschwunden, sondern seine Stärke liegt im Mittel der Jahre 1995–2024.

Aus der Erdgeschichte ist belegt, dass Warmzeiten mit ausgiebigen Niederschlägen und Eiszeiten mit geringen Niederschlägen einhergingen. Die Sahara war nicht immer eine sehr trockene Wüste wie heute; vor rund 130 000 bis 115 000 Jahren, dann vor 50 000 bis 45 000 Jahren und zuletzt nach der letzten Eiszeit gab es mehrere Tausend Jahre, in denen die Sahara ergrünt war und Flüsse sowie stehende Gewässer aufwies (Claussen et al. 2017). Damals lebten dort Krokodile, Elefanten und Giraffen. Wenn sich das Klima erwärmt und die Temperatur in den Meeren steigt, dann sollte man schon rein physikalisch erwarten, dass durch die Sonneneinstrahlung das Ozeanwasser erwärmt wird und größere Wassermengen verdunsten. Demnach wären die vermehrten Niederschläge, die lokal in den letzten Jahren auch in der Sahara auftraten, durch die beobachtete Klimaerwärmung durchaus rational erklärbar.

Ob die in Deutschland aufgetretenen Starkregenereignisse und Hochwasser der letzten Jahre ein Zeichen des „menschengemachten Klimawandels“ sind (wie in vielen Medien regelmäßig behauptet), ist jedoch nicht ganz so eindeutig zu beantworten. Denn Hochwasser gab es auch schon in früheren Jahrhunderten. Schaut man die Hochwassermarken der meisten Flüsse genauer an, so ergeben sich in den letzten Jahrzehnten kaum Auffälligkeiten. In allen Jahrhunderten gab es immer wieder Hochwasser so z. B. am Neckar bei Heidelberg (fünf Mal im 18. Jahrhundert, sechs Mal im 19. Jahrhundert; und über zehn Mal im 20. und 21. Jahrhundert). Daher ist es naheliegender, dass Starkregen und Überschwemmungen lokale Wetterphänomene darstellen und nicht notwendigerweise auf einen Klimawandel hinweisen. Die Schäden der rezenten Hochwasser (Ahr 2021, Süddeutschland 2024) traten jedoch besonders lokal auf, da in den letzten Jahrzehnten wider besseres Wissen Gebäude auch in potentiellen Hochwasserzonen errichtet wurden. Da Fließgewässer immer stärker begradigt wurden, fließen Niederschläge zudem schneller ab, da sie sich nicht mehr ins Erdreich einsickern können. Durch gezielte Anlage von Rückhaltebecken und Deichen sowie Renaturierung von Fließgewässern könnte man potentielle Schäden sicher einschränken.

Ausbleibende Niederschläge können Trockenheit auslösen, die für die Landwirtschaft und Menschen sehr negative Folgen haben können. Auch Waldbrände sind in trockenen Jahren häufiger als in nasskalten Jahren. Wenn mehrere Jahre der Trockenheit aufeinanderfolgen, melden sich die Alarmisten und prognostizieren Jahrzehnte oder sogar Jahrhunderte Trockenheit. Kalifornien wurde vor einem Jahrzehnt vermehrt von sehr trockenen Jahren heimgesucht. *LifeScience* und viele Umweltexperten postulierten schon seit 20 Jahren, dass die Mega-Dürre (*mega-drought*) in Kalifornien vermutlich ein Jahrhundert anhalten könnte. Überraschenderweise gab es in den

letzten beiden Jahren aber wieder sehr viel Regen und Schnee in Kalifornien, was der Mega-Dürre-Hypothese widersprechen würde.

Ein weiteres Thema der medialen Alarmmeldungen betrifft den steigenden **Meeresspiegel**. Der Meeresspiegel steigt tatsächlich: Am Ende der letzten Eiszeit vor rund 12 000 Jahren gab es einen dramatischen Anstieg um 120 Meter. Damals wurden große Areale der Erde geflutet. In Europa wurde England zu einer Insel; vorher war England mit dem europäischen Festland verbunden. Im Bereich des heutigen Nordsee lag das Doggerland, auf dem Menschen siedelten. Nach dieser ersten dramatischen Phase stieg der Meeresspiegel nur noch sehr langsam. Aktuell geht das IPCC von 1,7 mm pro Jahr aus. Sollte jedoch das Festlandeis von Grönland und Antarktis abschmelzen, würde es zu einem starken Anstieg kommen. Dieses Szenario haben sich viele Apokalyptiker z. B. Al Gore, zu eigen gemacht, und prognostiziert, dass weite Bereiche der Welt bald überflutet sein würden. Auch die UN spielte und spielt in der Liga der Alarmisten mit. So machte sie 1989 die Vorhersage, dass bald ganze Nationen von der Erde verschwinden würden, wenn der Klimawandel nicht bis 2000 rückgängig gemacht würde. Zum Glück haben sich diese Prophezeiungen bislang nicht bewahrheitet. 1988 sagten Experten voraus, dass der zu erwartende Anstieg des Meeresspiegels innerhalb der nächsten 30 Jahre zu einer Vernichtung der Malediven im Indischen Ozean führen würde. Die Malediven bestehen aus 26 ringförmigen Atollen, die aus mehr als 1.000 Koralleninseln gebildet werden. Heute, also 36 Jahre später, sind die Malediven immer noch nicht untergegangen, die Größe der Inseln nahm sogar zu. Soweit zu den Alarmmeldungen.

Wie man an diesen Beispielen erkennen kann, sind Prognosen und Modellierungen in den Umweltwissenschaften nicht nur schwierig, sondern manchmal unabsichtlich und manchmal wohl auch absichtlich falsch. G.E. Box hat diese missliche Lage mit den Worten „*All models are wrong, but some are useful*“ treffend zusammengefasst (Hendry 2023).

## 4 Ausblick

Wir Menschen erliegen leicht der Illusion, dass unser Leben und unsere Umwelt stabil sind, obwohl wir wissen, dass dies häufig nicht zutrifft, denn Zufall, Kommen und Gehen sind offensichtlich wichtiger als Stabilität. Zu dieser Erkenntnis kamen schon renommierte Philosophen (Heraklit, Epikur, Lukrez) in der Antike (Wink & Funke, 2016). Diese immanente Unsicherheit und Ungewissheit sind der Nährboden für Weissagungen, Prognosen, Aberglauben und Modellierungen. Seit die Erde vor rund 4,55 Milliarden Jahren entstand, haben sich die Erde und alle Lebewesen, also auch wir Menschen, kontinuierlich verändert und weiterentwickelt. Auf der Erde sind die

Lage und Größe der Kontinente oder das Klima nicht stabil, sondern im steten Wandel begriffen. Insbesondere in den letzten zwei Millionen Jahren, als wir Menschen und unsere Vorfahren evolvierten, trat ein zyklischer Wechsel von Warm- und Kaltzeiten auf, auf den wir Menschen keinen Einfluss hatten.

Wie bereits erörtert, steht die Menschheit vor großen Herausforderungen. Da wir Menschen in der Vergangenheit trotz großer Gefahren und Bedrohungen überlebt haben, dürfen wir als Optimisten hoffen, dass wir auch zukünftige Probleme und Herausforderungen dank technologischer Innovationen meistern können (Ridley 2010, 2015). Bei all unseren Prognosen, Plänen, Überlegungen und Maßnahmen dürfen wir jedoch niemals vergessen, dass wir eine sich verändernde und nicht statische Welt akzeptieren müssen. Wir müssen also lernen, mit der Ungewissheit zu leben und versuchen, die Zukunft verlässlich zu antizipieren. Wie in diesem Jahrbuch erörtert, sind Prognosen auf zukünftige Ereignisse schwierig, wenn sie nicht-lineare, komplexe oder chaotische Systeme betreffen. Wir müssen uns von Aberglauben und Esoterik befreien und versuchen, die Zukunft rational vorherzusagen. Die Wissenschaften und Wahrscheinlichkeitstheorie können uns dabei helfen – auf unser Bauchgefühl ist jedoch weniger Verlass.

**Dank:** Von Dr. Monika Niehaus erhielt ich hilfreiche Literaturhinweise.

## Literatur

- Alley, R. B., Emanuel, K. A., & Zhang, F.** (2019). Advances in weather prediction. *Science*, 363, 342–344.
- Broberg, G.** (2023). *The Man Who Organized Nature. The Life of Linnaeus*. Princeton University Press, Princeton & Oxford.
- Carson, R.** (1962). *Silent Spring*. Penguin Books, Bristol
- Chapman, A.D.** (2009). Number of living species in Australia and the world. *Australian Biological Resources Study* pp 1–80
- Claussen, M., Dallmeyer, A. & Bader, J.** (2017) *Theory and modeling of the African humid period and the green Sahara*. Oxford Research Encyclopedia of Climate Science.
- Ehrlich, P.** (1971). *Die Bevölkerungsbombe*. Hanser, München
- Funke, J. & Kruse, L.** (2024). Warum Prognosen einerseits wichtig sind und warum sie andererseits nicht wirklich helfen. In: Wink, M. & Nünning, V. (Hgb.), *Prognosen in der Wissenschaft*. Heidelberger Jahrbücher Online Band 9.
- Goodenough, A.** (2010) Are the ecological impacts of alien species misrepresented? A review of the “native good, alien bad” philosophy. *Community Ecology* 11, 13–21
- Habel JC, Trusch R, Schmitt T, Ochse M. & Ulrich W.** (2019). Long-term large-scale decline in relative abundances of butterfly and burnet moth species across south-western Germany. *Scientific Report* <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51424-1>
- Hallmann, C.A. et al.** (2017). More than 75 percent decline over 27 years in total

- flying insect biomass in protected areas. *PLOS ONE* 12, e0185809
- Hendry, A.P.** (2023) Predictions in ecology and evolution. *BioScience* 2023, 0, 1–15: <https://doi.org/10.1093/biosci/biado83>
- Kaiser, R.** (1980). *Global 2000. Der Bericht an den Präsidenten*. Zweitausendeins, Frankfurt.
- Keulemans, M.** (2010). *Exit Mundi. Die besten Weltuntergänge*. Dtv
- Linné, C. von** (1735–1768). *Systema Naturae*.
- Linné, C. von** (1749). *Oeconomia Naturae*.
- Linné, C. von** (1753). *Species Plantarum*.
- Meadows, D.** (1972). *Die Grenzen des Wachstums. Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit*. Deutsche Verlagsanstalt, Stuttgart
- Netz, C. & S. Renner** (2017). Long-spurred Angraecum orchids and long-tongued sphingid moths on Madagascar: A time-frame for Darwin's predicted *Xanthopan/Angraecum* coevolution. *Biological Journal of the Linnean Society* 122, 2017, [https://www.deutschestextarchiv.de/book/show/burckhardt\\_renaissance\\_1860](https://www.deutschestextarchiv.de/book/show/burckhardt_renaissance_1860)
- Niehaus, M. & Wink, M.** (2020) *Wie man Männer in Schweine verwandelt und wie man sich vor solch üblen Tricks schützt*. Hirzel-Verlag, Stuttgart.
- Pearce, F.** (2015). *Die neuen Wilden. Wie es mit fremden Tieren und Pflanzen gelingt, die Natur zu retten*. Oekom-Verlag
- Popper, K. R.** (1935) *Logik der Forschung* Springer, Wien.
- Rasool, S. I. & Schneider, S. H.** (1971). Atmospheric carbon dioxide and aerosols: Effects of large increases on global climate. *Science* 173 (3992): 138–141
- Ridley, M.** (2010). *The Rational Optimist. How Prosperity Evolves*. Fourth Estate, London
- Ridley, M.** (2015). *The Evolution of Everything – How New Ideas Emerge*. HarperCollins Publishers, New York
- Ritchie, H.** (2024). Weather forecasts have become much more accurate; we now need to make them available to everyone. Published online at OurWorldInData.org. Retrieved from: <https://ourworldindata.org/weather-forecasts>
- Seibold, S. et al.** (2019) Arthropod decline in grasslands and forests is associated with landscape-level drivers. *Nature* 574, 671–674
- Stewart, J.** (2022). *Wetter, Viren und Wahrscheinlichkeit. Wie wir die Ungewissheiten des Lebens berechenbar machen*. Rowohlt, Hamburg.
- Storch, V., Welsch, U. & Wink, M.** (2013). *Evolutionsbiologie*. 3. Auflage; Springer, Heidelberg.
- Sweetlove L.** (2011). Number of species on Earth tagged at 8.7 million. *Nature* <https://doi.org/10.1038/news.2011.498>
- Weiß, C.** (2024) Statistische Prognosemethoden – Top oder Flop? In: Wink, M. & Nünning, V. (Hgb.), *Prognosen in der Wissenschaft*. Heidelberger Jahrbücher Online Band 9.
- Wink, M.** (2014). *Ornithologie für Einsteiger*. Springer-Spektrum, Heidelberg
- Wink, M.** (2020). Biodiversität in Gefahr. In: L. Jäkel, U. Kiehne, S. Frieß, *Biologische Vielfalt erleben, wertschätzen, nachhaltig nutzen, durch Bildung stärken*. Shaker-Verlag, Düren, 23–50
- Wink, M.** (2021). DNA analyses have revolutionized studies on the taxonomy and evolution in birds. *IntechOpen*, <https://www.doi.org/10.5772/intechopen.82911>
- Wink, M. & Funke, J.** (Hrsg.). (2016). *Stabilität im Wandel*, Heidelberger Jahrbücher Online Band 1. Heidelberg University Publishing. <https://doi.org/10.17885/hdjbo.2016.0>
- Winstanley, D., Spencer, R. & Williamson, K.** (1974). Where have all the Whitethroats gone? (1974). *Bird Study*, 21, 1–14. <https://doi.org/10.1080/00063657409476397>
- Yates K.** (2024). *Wie man vorhersieht, womit keiner rechnet. Richtige Prognosen treffen und unnütze vermeiden*. Piper Verlag, München

## Über den Autor

**Michael Wink** (geb. 1951 in Esch-Bad Münstereifel) ist Ordinarius für Pharmazeutische Biologie an der Universität Heidelberg, wo er seit 1989 die Abteilung Biologie am Institut für Pharmazie und Molekulare Biotechnologie leitete. Seit seiner Emeritierung arbeitet er seit dem 01.10.2019 dort als Seniorprofessor. Nach dem Studium der Biologie an der Universität Bonn erfolgten 1980 die Promotion und 1984 die Habilitation an der TU Braunschweig. Gefördert durch ein Heisenberg-Stipendium der DFG konnte er von 1985 bis 1988 am MPI für Züchtungsforschung in Köln und am Genzentrum der LMU München forschen. 1988 wurde er auf eine Professur an die Universität Mainz und 1989 an die Universität Heidelberg berufen. Seine Arbeitsgebiete reichen von Phytochemie, Arznei- und Giftpflanzen, Ornithologie und Naturschutz bis zur Systematik, Phylogenie und Evolutionsbiologie. Er ist Autor/Co-Autor von mehr als 40 Büchern und über 1000 Originalarbeiten. Er ist aktuell Gastprofessor an Universitäten in China und Mexiko, außerdem Mitglied diverser Wissenschaftlicher Beiräte, Ko-Herausgeber des Heidelberger Jahrbuchs, Editor-in-Chief (*Diversity*) und Academic Editor einiger Zeitschriften (*Journal of Ornithology*, *PeerJ*, *Frontiers*) und Empfänger mehrerer Auszeichnungen.

## Korrespondenzanschrift

Prof. Dr. Michael Wink,  <https://orcid.org/0000-0002-7875-4510>  
Institut für Pharmazie und Molekulare Biotechnologie,  
Universität Heidelberg, D-69120 Heidelberg  
wink@uni-heidelberg.de  
www.winks-biology.com