

schleppte Säugetiere bedroht. Eine zunehmende Gefahr dürfte auch vom Klimawandel ausgehen, indem er beispielsweise die Gebiete einschränkt, die bestimmte Arten aufgrund ihrer Vorzugs- und Aktivitätstemperaturen bewohnen können, oder indem das Geschlechterverhältnis solcher Arten verschoben wird, die eine temperaturabhängige Geschlechtsentwicklung aufweisen.

Angesichts dieser dramatischen Bedrohungssituation sind Schutzmaßnahmen dringend notwendig, insbesondere die Unterschutzstellung der Lebensräume. Teilweise profitieren gefährdete Reptilien bereits von Schutzgebieten, die für andere Tiere eingerichtet wurden, beispielsweise Säugetiere. Gerade für solche Reptilienarten, die nur ein sehr kleines Verbreitungsgebiet bewohnen (Abbildung 3a und b),

das nicht innerhalb bereits bestehender Reservate liegt, müssen jedoch gesonderte Schutzmaßnahmen geprüft werden. Ebenfalls essenziell ist die Bekämpfung invasiver Arten, die Reptilien bedrohen.

[1] N. Cox et al. (2022). A global reptile assessment highlights shared conservation needs of tetrapods. *Nature* 605, 285–290.

Kriton Kunz, Speyer

## BIOMATHEMATIK

# Stoffwechselraten, Lebenszyklen und Körpergewicht

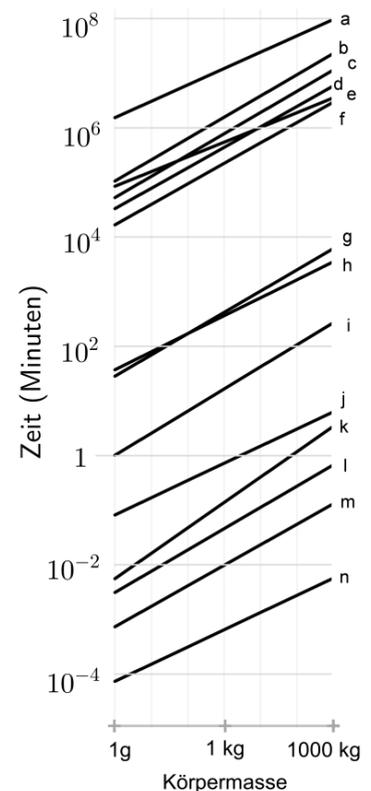
Unter Lebenszyklen  $L$  versteht man Größen wie die durchschnittliche Lebensdauer, Dauer bis zur Fortpflanzungsfähigkeit, Tragzeit, Dauer eines Atemzugs, Dauer eines Herzschlags, Halbwertszeit beim Drogenabbau und andere. Ihre Abhängigkeit von der artspezifischen Durchschnittsmasse wurde seit den 1960er Jahren untersucht und lieferte die empirische Proportionalität  $L \sim m^{1/4}$ . Hier wird gezeigt, dass sich dieses Gesetz einfach aus dem Dreiviertelgesetz  $E \sim m^{3/4}$  für Stoffwechselraten  $E$  ableiten lässt. Damit ist ersichtlich, dass auch die Lebenszyklen verschiedener Spezies durch Stoffwechselprozesse bestimmt sind, die im Laufe der Evolution unverändert geblieben sind.

Empirische Untersuchungen von Max Kleiber [1] zeigten bei Säugetieren einen speziesübergreifenden Zusammenhang zwischen Körpermasse  $m$  und Stoffwechselrate  $E$ , der als Dreiviertelgesetz bzw. Kleibersches Gesetz  $E \sim m^{3/4}$  bekannt ist. Hierbei versteht man unter der Stoffwechselrate eines Organismus seinen Energieumsatz pro Zeit in Ruhe. Da die Stoffwechselrate einer Art seine Lebensweise wesentlich mitbestimmt, bietet das Dreiviertelgesetz ein Hilfsmittel zur Erklärung evolutionärer Tendenzen bei der Besiedlung ökologischer Lebensräume und Nischen.

### Mitochondrien als Verbindungsglied von Stoffwechsel- und Alterungsprozessen

Erkenntnisse aus der Zellbiologie weisen auf einen Zusammenhang

zwischen Lebensdauer und Stoffwechsel hin, da bei intensiver ATP-Produktion in den Mitochondrien gleichzeitig vermehrt Sauerstoffradikale entstehen, die den Alterungsprozess beschleunigen [3]. Die Abhängigkeit verschiedener Lebenszyklen vom Körpergewicht bzw. den Gewichten verschiedener Organe wie Herz oder Hirn wurde von einer Vielzahl von Autoren untersucht und in der Monographie von W. A. Calder [2] zusammengefasst (Abbildung 1). Empirische Untersuchungen ergaben  $L \sim m^\alpha$ , wobei der Exponent  $\alpha$  je nach gewähltem Lebenszyklus und zugrunde liegender Masse zwischen 0,2 und 0,28 schwankt. Verallgemeinert formulierte William Calder [2] für Lebenszyklen von Säugetieren und Vögeln eine Massenabhängigkeit  $L \sim m^{1/4}$ .



**ABB. 1** Beziehung zwischen Körpermasse und Länge biologischer Perioden bzw. Zyklen für Säugetiere. a: max. Lebensdauer in Gefangenschaft; b: Wachstumsdauer bis 98% Masse; c: Mindestdauer zur Populationsverdopplung; d: Dauer zur Geschlechtsreife; e: Wachstumsdauer bis 50% Masse; f: Tragzeit; g: Metabolisierungsdauer für Fett im Äquivalent von 0,1% Körpermasse; h: Inulin-Clearance; i: Para-Aminohippursäure-Clearance; j: Zirkulationsdauer des Blutvolumens; k: Dauer der Darmmotilität; l: Dauer des Atemzyklus; m: Dauer des Herzzyklus; n: Dauer der Muskelzuckung bei *m. extensor digitorum longus*. Abb: R. Spielmann nach [2], Tabelle 6-1.

## Verbindung zwischen Lebenszyklus- und Dreiviertelgesetz

Lebenszyklen lassen sich in zwei Kategorien einteilen. Einerseits gibt es kurzzeitige, für das Individuum periodische Zeitabschnitte wie die Dauer eines Herzschlags, Atemzugs oder einer Muskelkontraktion. Andere Lebenszyklen sind für das Individuum einmalige, aber artspezifische Zeitabschnitte wie die Lebensdauer oder die Dauer bis zur Geschlechtsreife.

Für die Massenabhängigkeit in der ersten Kategorie findet man bei W. A. Calder [2] folgende Erklärung: Ebenso wie die Dauer eines Herzschlags mit dem Schlagvolumen ist jede Zykluslänge  $L$  mit einem spezifischen Volumen  $V$  verknüpft, welches wiederum proportional zu einer spezifischen Masse  $m$  ist. Für  $E$  als Energieumsatz pro Zeit ist  $\frac{V}{L} \sim E$ . Also folgt mit dem Dreiviertelgesetz

$$\frac{V}{L} \sim m^{\frac{3}{4}} \text{ bzw. } L \sim \frac{V}{m^{\frac{3}{4}}}$$

$V \sim m$  ergibt sich daraus  $L \sim m^{1/4}$ .

Nun soll für eine artspezifische Zykluslänge der zweiten Kategorie eine Verbindung zum Dreiviertelgesetz aufgezeigt werden. Mit  $L_f$  bezeichnen wir die durchschnittliche

Zeitdauer zum Erreichen der Fertilität, während  $m_f$  die Durchschnittsmasse des jungen geschlechtsreifen Organismus ist. Bis zur Geschlechtsreife wird das Massenwachstum durch die Stoffwechselrate bestimmt, also

$$\frac{dm}{dt} \sim E.$$

Mit dem Dreiviertelgesetz folgt daraus

$$\frac{dm}{dt} \sim m^{\frac{3}{4}}$$

bzw. mit einer Konstanten

$$\frac{dm}{dt} = c \cdot m^{\frac{3}{4}}$$

Integrieren wir mittels Trennung der Variablen, so folgt

$$\int_0^{m_f} m^{-\frac{3}{4}} dm = c \cdot \int_0^{L_f} dt$$

$$4m_f^{1/4} = c \cdot L_f$$

und damit  $L_f \sim m_f^{1/4}$ .

Für alle zu  $L_f$  proportionalen Lebenszyklen und alle zu  $m_f$  proportionalen Massen folgt nun  $L \sim m^{1/4}$ .

Damit wird klar, dass die Abhängigkeit der entsprechenden Lebenszyklen von der Masse kein Zufall ist, sondern durch Stoffwechselprozesse bestimmt ist, deren Grundprinzip sich im Verlaufe der Evolution erhalten hat.

## Artspezifische Verkürzung der Lebensdauer trotz intensiviertem Immunsystem

Führt man die relative Stoffwechselrate  $r = \frac{E}{m}$  als Maß für den spezifischen Energieumsatz pro Zeiteinheit ein, so folgt mit dem Dreiviertelgesetz  $r \sim m^{-1/4}$

Gleichzeitig ergibt sich aus  $L \sim m^{1/4}$  die Beziehung  $L \sim r^{-1}$ . Hieraus ist ersichtlich, warum kleinere Tiere verwandter Spezies zwar eine höhere relative Stoffwechselrate und schnellere Immunantworten, jedoch tendenziell eine kürzere Lebenserwartung besitzen [3].

## Literatur

- [1] M. Kleiber (1947). Körpergröße und Stoffwechselrate. *Physiologische Bewertungen*. 27(4), 511–541.
- [2] W. A. Calder (1984). *Size, Function and Life History*. Harvard University Press, Cambridge, MA and London, England.
- [3] A. J. Hulbert et al. (2007). Life and death: metabolic rate, membrane composition, and life span of animals. *Physiol. Rev.* 87(4), 1175–1213.
- [4] R. Spielmann (2020). *Biomathematik*. De Gruyter, Berlin.

Raj Spielmann,  
Muri bei Bern/Schweiz

## ORNITHOLOGIE

### Kohlmeisen – Trotz sie dem Klimawandel?

**Vögel sind noch immer die wohl am weitesten verbreitete Tierklasse. Sie leben auf allen Kontinenten und das schon seit mindestens 150 Millionen Jahren. Mehr als 10.000 Arten sind bekannt – dies wohl vor allem denjenigen, die sich mit wissenschaftlichem Anspruch mit ihnen beschäftigen. Damit sind sie für die Biologie hervorragende Modellorganismen, um den hochkomplexen Fragen des Klimawandels und deren Auswirkungen nachzugehen – insbesondere Anpassungsmechanismen lebender Organismen an Veränderungen von Klimazyklen aufzuspüren, die bis in die Physiologie hineinreichen können.**

Dass Vögel sich durch ihr Zugverhalten an Klimaveränderungen relativ schnell anpassen können, belegen Zugvogelbeobachtungen, die aufzeigen, dass die Rückkehrer aus den Win-

terquartieren hierzulande inzwischen teilweise mehrere Wochen früher ankommen, die Abflugzeiten sich im Herbst nach hinten verlagern und die Individuen einiger Arten inzwischen

immer häufiger ganzjährig hier überwintern [1, 2]. Dass sogar Standvögel wie die Kohlmeise (Abbildung 1) ihre Anpassungsmechanismen an wechselnde Umgebungstemperaturen verfeinern und einzelne Individuen sich dadurch vielleicht innerhalb der Population einen Überlebensvorteil sichern könnten, der sie noch weniger „anfällig“ für Klimaveränderungen macht, ist inzwischen in den Bereich des Möglichen gerückt. Jedenfalls weisen darauf jüngste Ergebnisse des in Gründung befindlichen Max-Planck-Instituts für biologische Intelligenz hin [3].

Sie zeigen auf, dass die Blutwerte von Glukokortikoidhormonen der Vögel bei Änderungen der Umgebungstemperatur unterschiedlich stark schwanken. Dadurch können



**ABB. 1 Die Kohlmeise (*Parus major*) bleibt unseren Gärten auch im Winter treu.**



Verband | Biologie, Biowissenschaften  
& Biomedizin in Deutschland

**GEMEINSAM  
FÜR DIE**

**BIEWISSENSCHAFTEN**

### **Gute Gründe, dem VBIO beizutreten:**

- Werden Sie Teil des größten Netzwerks von Biowissenschaftlern in Deutschland
- Unterstützen Sie uns, die Interessen der Biowissenschaften zu vertreten
- Nutzen Sie Vorteile im Beruf
- Bleiben Sie auf dem Laufenden – mit dem VBIO-Newsletter und dem Verbandsjournal „Biologie in unserer Zeit“
- Treten Sie ein für die Zukunft der Biologie



[www.vbio.de](http://www.vbio.de)

**Jetzt beitreten!**

