

Die BERGMANNsche Regel in der Ökologie auf dem didaktischen Prüfstand

Martin Post

Manche naturwissenschaftlichen Hypothesen haben zur Formulierung eines Gesetzes oder einer Regel geführt. Dieses - aus erkenntnistheoretischer Sicht allerdings nur scheinbar - gesicherte Wissen kann angewendet werden. Daher kommt die Sehnsucht auf, Gesetze und Regeln zu haben, auch in der Ökologie. Besonders Ende des neunzehnten und Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts ist dieses Verlangen umgesetzt worden. Die moderne Ökologie diskutiert dagegen nur noch sehr wenige Kandidaten für Gesetze. Deshalb ist es lernhinderlich, auf überkommenen Bezeichnungen wie Klimaregeln zu beharren. Es wird erläutert, dass eine dieser Regeln ohne den Begriff Regel auskommt, weil die zugehörigen Hypothesen das naturwissenschaftliche Verständnis eher fördern, als es ein Festhalten an der veralteten Bezeichnung Regel vermag.

1 Sprech- und Darstellungsweisen auf dem Prüfstand

In heutigen Hochschul- und Schullehrbüchern werden in der Ökologie die sogenannten Klimaregeln besprochen. Die nach C. BERGMANN benannte Regel ist die prominenteste. Im Erwartungshorizont einer Abiturklausur in Nordrhein-Westfalen heißt es:

„Die Größenvariation der Unterarten [des Zaunkönigs] folgt der BERGMANNschen Regel, die besagt, dass innerhalb eines Verwandtschaftskreises in kälteren Gebieten oft größere Individuen [gleichwarmer Tiere] leben als in wärmeren Gebieten.“

Das Phänomen soll z. B. folgendermaßen erklärt werden:

„Vögel halten als gleichwarme Tiere ihre Körpertemperatur gegen die Außentemperatur aufrecht. Für die Wärmeabgabe ist die Oberfläche des Tieres maßgebend. Das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen ist bei größeren Tieren kleiner als bei kleinen Tieren.“

Das vorgenannte Wissen soll angewendet werden:

„Die großen Zaunkönige Islands verlieren somit verhältnismäßig weniger Wärme als ihre kleineren südlichen Verwandten. Ähnliches gilt bezüglich der Eigröße. Größere Eier in kälteren Klimaten kühlen bei kurzfristigem Verlassen des Nestes durch den brütenden Altvogel weniger schnell ab. Damit werden Entwicklungsverzögerungen vermindert.“

Es offenbart sich ein festgefügtes Argumentationsschema. Hypothesen kommen nicht vor.

Eine Schülerin begann die Aufgabenlösung folgendermaßen:

„Gemäß der Bergmannschen Regel gilt:“

Offensichtlich ist der Begriff Regel so stark, dass der gedankliche und der fachliche Hintergrund verblasen. Weitere Schüler argumentieren genau so. Auch die Formulierung aus dem Erwartungshorizont ist unglücklich. Die Größenvariation soll einer Regel

folgen. Fachlich angemessen ist jedoch, dass die Größenvariation bei den Zaunkönigen folgende häufig gemachte Beobachtung bestätigt: Bei nahe verwandten Homoiothermen leben in kälteren Gebieten oft größere Individuen. Wenn man dagegen einer Regel folgt, klingt das so, als ob man sich an die Regel gehalten hat. Bei der Schülerin wird noch deutlicher, dass eine Regel zur Anwendung kommt. Die Formulierung und Begründung der BERGMANNschen Regel erfolgt im Schulbereich unterschiedlich. In einem Schulbuch steht zum Beispiel eine andere Formulierung als im oben zitierten Erwartungshorizont:

„Innerhalb einer homoiothermen Tierart sind Individuen aus kalten Gebieten durchschnittlich größer als solche aus warmen Gebieten. Auch bei verschiedenen Tierarten eines Verwandtschaftskreises, wie zum Beispiel bei Pinguinen, findet man eine entsprechende klimabedingte Größenabstufung. Dieses Phänomen wird als BERGMANNsche Regel bezeichnet und lässt sich damit erklären, dass das für den Wärmehaushalt wichtige Verhältnis von Volumen zu Oberfläche für einen großen Körper günstiger ist als für einen kleinen. Da die Wärmebildung vor allem vom Körpervolumen, die Wärmeabstrahlung aber von der Körperoberfläche abhängt, sind große Tiere bei niedriger Außentemperatur im Vorteil.“ (WEBER, 2015).

Die Aussage „die Individuen sind oft größer“, besagt etwas anders als „die Individuen sind durchschnittlich größer“. Außerdem werden im Schulbuch die Ausnahmen nicht in die Formulierung der Regel integriert. Weiter unten im Schulbuchtext wird dann gesagt, dass es wegen des Einflusses anderer Faktoren auf die Körpergröße zahlreiche Ausnahmen gibt. Dies wird aber nicht bewertet. Schließlich wird im Schulbuch mit dem Wort „klimabedingt“ eine erklärende Behauptung in die Phänomenbeschreibung integriert. Es wird trotz des Erwähnens der Ausnahmen nicht klar zwischen Korrelation und Kausalität unterschieden. In beiden Quellen wird mit den Be-

griffen Art und Verwandtschaftskreis ein evolutionsbiologischer Kontext angedeutet, aber nicht benannt und nicht erläutert.

Der übliche Argumentationsgang in Lehrbüchern und auch im beobachteten Unterricht ist folgender.

Gliederung	Inhalt	Erkenntnis
Ein Phänomen wird mitgeteilt.	Bei nahe verwandten Individuen gleichwarmer Tiere wohnen oft die größeren in kälteren Regionen. Das Phänomen heißt BERGMANNsche Regel.	Nicht ganz starke Korrelation; impliziter Begriff Regel
Das Problem wird selten explizit benannt.	Implizit: Wie lässt sich das Phänomen erklären?	Vermutung einer Kausalität
Der Lösungsvorschlag wird als sicherer Weg zur Lösung benannt.	Implizit: Wärmeproduktion und Wärmeabgabe verschieden großer Tiere müssen verglichen werden.	Vorgabe: Bestimmtes Vorwissen ist nötig.
Die Lösung wird mitgeteilt und durch Modellversuch plausibel gemacht.	Die relative Wärmeabgabe bei unterschiedlich großen gleich gebauten Körpern erklärt das Phänomen, exemplarisch im Modellversuch.	Kausale Plausibilitätserklärung
Einige Probleme im Kontext der „Regel“ werden benannt.	Ausnahmen von der Regel werden bei der Formulierung der Regel genannt.	Einschränkung der Korrelation
	Ausnahmen von der Erklärung werden erwähnt.	Einschränkung der Kausalität
Weitere offene Probleme werden selten benannt	Weshalb gilt die Regel am ehesten bei naher Verwandtschaft?	Fehlt häufig, weil das Lernziel fehlt
	Wie sind die Ausnahmen von der Regel und von der Erklärung zu erklären?	

Tabelle 1: Argumentation zur BERGMANNschen Regel in der schulischen Praxis.

In einem modernen Hochschullehrbuch wird zwar die BERGMANNsche Regel unter ihrem Namen besprochen. In einem grundsätzlichen einleitenden Kapitel wird aber der Begriff Regel mit folgender Begründung als nicht sinnvoll zurückgewiesen:

„Scheinbar zufällige Prozesse, die als stochastisch bezeichnet werden, prägen ökologische Zusammenhänge.“ ... „Typologische und deterministische Ansätze stehen daher einem Verständnis der Ökologie entgegen [...]“ ... „Heute würden wir diese Zusammenhänge nicht mehr als „Gesetz“ oder „Regeln“ deklarieren, sondern sie eher in den Rahmen der Theoriebildung stellen und als Hypothese bezeichnen.“ (NENTWIG, 2004, S. 3).

Im Kernlehrplan NRW bezieht man erkenntnistheoretische Fragen mit folgender Kompetenzbeschreibung ein.

„Die Schülerinnen und Schüler erläutern die Aussagekraft von biologischen Regeln (u.a. tiergeographische Regeln) und grenzen diese von naturwissenschaftlichen Gesetzen ab.“ (MINISTERIUM FÜR SCHULE UND WEITERBILDUNG DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN, 2014).

Man stellt sich damit gegen die Auffassung der Wissenschaft Ökologie, dass es solche Regeln nicht gibt. Des Weiteren sind im Lehrplan Biologie keine naturwissenschaftlichen Gesetze vorgesehen, gegen die man etwas abgrenzen kann.

2 Verwirrungspotenzial obiger Sprech- und Darstellungsweisen

BERGMANN hat sinngemäß folgende Hypothese entwickelt:

Weil nahe verwandte Arten sehr wahrscheinlich ähnlichen Körperbau und ähnliche innere Funktionen haben, ist es wahrscheinlich, dass unter nahe verwandten homoiothermen Tieren die kleineren häufiger in wärmeren Regionen anzutreffen sind und die größeren häufiger in kälteren.

Die Formulierungen der oben genannten Regel und ihrer Erklärung enthalten keine Hypothesen mehr. Daraus ergibt sich Verwirrungspotenzial in sachlicher Hinsicht, in fachlicher Hinsicht, in sprachlicher

Hinsicht und insgesamt in der Unvollständigkeit der Argumentation.

2.1 Sachliche Aspekte

Die Schulbuchaussage „Da die Wärmebildung vor allem vom Körpervolumen, die Wärmeabstrahlung aber von der Körperoberfläche abhängt, sind große Tiere bei niedriger Außentemperatur im Vorteil.“ ist sachlich falsch. Die Aussage gilt nicht bei Kleinsäugetieren unter einem Kilogramm Körpergewicht. Viele von ihnen nutzen im Winter andere Energiesparmaßnahmen, bei denen ein kleiner Körper im Vorteil

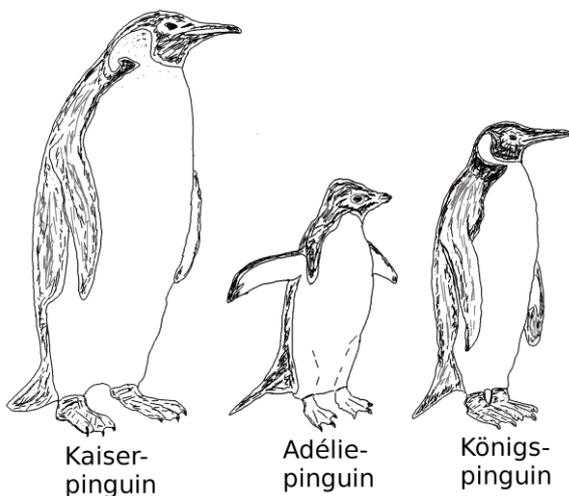
ist. Sie zeigen eine winterliche Verringerung der Körpermasse. Der zitierte Satz hat zwar eine wahre Prämisse, aber eine falsche Aussage in der Konklusion und ist damit sachlich nicht richtig.

Zweitens ist die Argumentation zur Wärmeabgabe verschieden großer Körper zumeist unklar. Das Ergebnis des häufig im Unterricht eingesetzten Modellversuchs zur Wärmeabgabe, zum Beispiel bei gleich heißen, aber verschieden großen Kartoffeln, wird mithilfe verschieden großer Würfel plausibel gemacht. Mehr geschieht dann aber häufig nicht. Es fehlt eine evolutionsbiologische Erläuterung: Die „bevorzugten“ Individuen werden im Fach Biologie als Mitglieder einer Population gesehen. Die Ausprägung von Eigenschaften wird als durch die Selektion geprüft angesehen. Wie sich in diesem Zusammenhang der „Vorteil“ eines Individuums gegenüber einem anderen auswirken kann, wird nicht diskutiert. In der Formulierung der Regel wird dennoch auf die Art oder den Verwandtschaftskreis Bezug genommen, in der Begründung zum beobachteten Ergebnis dann aber wieder nicht.

Von den Schülerinnen und Schülern wird gemäß Lehrplan erwartet, dass sie die Aussagekraft von biologischen Regeln (u.a. tiergeographische Regeln) erläutern und diese von naturwissenschaftlichen Gesetzen abgrenzen. Die Ausnahmen von der Regel stecken schon in der Formulierung der Regel. Damit ist ein Anspruch auf Allgemeingültigkeit grundsätzlich ausgeschlossen. In der Trivialität einer solchen Argumentation steckt Verwirrpotential.

2.2 Fachliche Aspekte

Der größte fachliche Fehler besteht darin, dass im zitierten Schulbuch und auch in anderen Schulbüchern das Pinguin-Beispiel auf die Regel hin manipuliert wird. Pinguinarten, die nicht in die Reihe passen, werden ohne Begründung weggelassen. Würde man sie einbinden, hätte man viel zu erklären. Zum



Beispiel lebt der 70 cm große Adélie-Pinguin mit einer Körpermasse von etwa 4 bis 5 Kilogramm teilweise im selben Areal wie der Kaiserpinguin, der 115 cm groß wird, bei einer Masse von 30 Kilogramm. Dieses Areal ist deutlich südlicher mit deut-

lich niedrigeren Temperaturen als der Wohnort des Königspinguins, der bei 95 cm Körpergröße etwa 15 Kilogramm wiegt. Es gibt weitere Pinguinarten, die nicht erwähnt werden. Weshalb man gerade an einem Formenkreis mit derartigen Ausnahmen die Regel erklären möchte, ist verwirrend.

2.3 Sprachliche Aspekte

In der genannten Abiturklausur werden lediglich die Ei- und Körpermaße der Zaunkönige mitgeteilt, keine physiologischen Daten. Es wird aber behauptet, dass die „großen Zaunkönige Islands [verlieren] somit verhältnismäßig weniger Wärme als ihre kleineren südlichen Verwandten“ verlieren. Das Arbeitsmaterial lässt diese Schlussfolgerung nicht zu. Sie soll aus dem Gelernten berichtet werden. Die Regel verleitet zu einer floskelhaften Antwort. Zumindest eine Einschränkung der Aussage als Vermutung ist angemessen, da es weitere Regulatormöglichkeiten gibt. Die – einzelgängerischen – Zaunkönige nutzen im Winter zum Beispiel Schlafgemeinschaften und verringern so die Wärmeabgabe. Die Formulierung als Regel legt nicht nahe, den hypothetischen Charakter der Aussagen wach zu halten.

Ausnahmen von der Regel gibt es bemerkenswert viele. Bei eurasischen Vögeln sind es 16%, bei nordamerikanischen Singvögeln 26%, bei west- und mitteleuropäischen Säugetieren sogar 40% und bei nordamerikanischen Säugetieren 19%. Die auf Spitzbergen lebenden nördlichsten Rentiere sind besonders klein (SEDLAG, 1995, S. 47). Im Schulbuch wird zwar auf zahlreiche Ausnahmen hingewiesen. Aber bei wie vielen Ausnahmen soll ein Phänomen noch den Namen Regel tragen? Das ist zumindest eine sprachliche Verwirrung. Darüber hinaus kollidiert die größere Anzahl an Ausnahmen mit der sprachlichen Konnotation, dass „eine Regel zu befolgen ist“. Es ist also didaktisch unangemessen, den Begriff Regel zu benutzen, wie sich sowohl im Erwartungshorizont für die Abiturklausur als auch in der Formulierung der zitierten Schülerin zeigt. Man sollte den Begriff Regel vermeiden, wenn es möglich ist.

2.4 Argumentationsaspekte

BERGMANN hat Hypothesen begründet. Er hat erläutert, wie seine Hypothesen angemessen formuliert werden müssen und weshalb er sich auf nahe verwandte Arten beschränkt. Mit der Bemerkung „Ja wie zum Spotte unserer Forschung finden wir die grössten mit den kleinsten warmblütigen Thieren des Festlandes in gleichen Breitengraden.“ (BERGMANN, 1848, S. 12), leitet er die Begründungen ein. Kolibris und Elefanten sind gemeint. Wenn solche Überlegungen fehlen, besteht das Verwirrpotenzial der im Vordergrund stehenden Regel darin, dass sie und ihre Erklärungen zu oberflächlich sind.

3 Anregungen zur Minimierung von Verwirrung und Verständnisschwierigkeiten

3.1 Argumentation

Bergmanns Argumente

Grundlegend für ein angemessenes Verständnis ist es, dass nachvollziehbar und schlüssig argumentiert

wird. Hier kann man von BERGMANN lernen. Er führt genau die Argumente aus, die in den Schulbüchern meistens fehlen.

Schritt	Inhalt	Erkenntnis
1 Problemgrund	Verdoppelt man bei einem Würfel die Kantenlänge, vergrößert sich sein Oberflächeninhalt auf das Vierfache und sein Volumen auf das Achtfache. ⁱ Das Körpervolumen eines Tieres ist der Ort der Wärmeproduktion, die Körperoberfläche ist der Bereich der Wärmeabgabe. ⁱⁱ Größere Homoiotherme müssen in Relation zu ihrer Größe weniger Wärme produzieren als kleinere. ⁱⁱⁱ Das ist eine unumstößliche Feststellung, ein Gesetz.	Phänomen, Geometrische Evidenz; Phänomen, Physiologische Evidenz; Schlussfolgerung
2 Problemerkennntnis	Der genannte Zusammenhang muss Einfluss auf die Lebensweise der Tiere haben, obwohl dem anscheinend widerspricht, dass Elefanten und Kolibris in denselben Breitengraden vorkommen. ^{iv}	Idee im Kontext; kognitiver Konflikt
3 Problem	Wie zeigt sich der Einfluss des genannten Gesetzes auf die Lebensweise der Homoiothermen?	Vermutung einer Kausalität
4 Problemanalyse	Wärmebildung hat etwas mit der Qualität und Quantität der Nahrung zu tun. Zur Wärmeabgabe gibt es diverse Aspekte: z.B. Hautbeschaffenheit, Verdunstung, Lebensweise, Medium und Klima. ^v Die Vielfalt der Möglichkeiten der Wärmeproduktion und -abgabe führt zum Nebeneinander verschieden großer Homoiothermen in einem Klima. ^{vi}	Bereitgestelltes Vorwissen
5 Hypothesenbildung	Falls zwei Homoiotherme bau- und funktionsgleich sind, hat die Wärmeabgabe einen entscheidenden Einfluss. Der Größere passt in den kälteren Lebensraum. ^{vii} Arten einer Gattung haben viele Gemeinsamkeiten. ^{viii}	Schlussfolgerung; Wissen um Fachmethode
6 Hypothesenformulierung	Falls es Gattungen gibt, deren Arten sich fast ausschließlich in der Größe unterscheiden, würden die kleineren in wärmeren Lebensräumen leben. ^{ix} BERGMANNS Hypothese	Schlussfolgerung
7 Lösungsidee	Daten über die Verbreitung homoiothermer verwandter Arten müssen aus der Literatur herausgesucht werden.	Idee mit Vorwissen
8 Lösungsplanung	Methodenkritik mit Bezug auf die Datenlage ^x ; Beschränkung bei den Homoiothermen auf Vogelarten ^{xi}	Ressourcenrecherche
9 Lösung	Für die betrachteten Vogelarten ist nachgewiesen, dass bei Tiergattungen mit mehreren Arten die Arten mit den kleineren Individuen häufiger in wärmeren Lebensräumen anzutreffen sind, die anderen in kälteren. ^{xii}	Bestätigung der Hypothese, in gewissem Umfang
10 Rückbezug auf Hypothese und Problem	Diskussion der Sicherheit und Wahrscheinlichkeit der Bestätigung der Hypothese durch die erhaltene Lösung, dabei Diskussion möglicher Fehler in der Systematik und Einflüsse weiterer Faktoren auf die Körpergröße. ^{xiii, xiv} Der Einfluss auf die Lebensweise ist wahrscheinlich ^{xv} und verträglich mit dem geäußerten kognitiven Konflikt. ^{xvi}	Beschränkung der Gültigkeit der Hypothese; Teillösung des Problems
11 Offene Probleme	Weitere Forschung ist nötig, sagt BERGMANN. ^{xvii} Einbezug der Evolutionstheorie: Diskussion möglicher Selektionsfaktoren Diskussion modifikatorischer Änderungen	wird kommen für BERGMANN unmöglich

Tabelle 2: BERGMANNs Argumentation zum Forschungsvorhaben: „Verteilung (nahe verwandter) homoiothermer Tiere auf unterschiedlich warme Lebensräume“. (Fußnoten stehen am Dateende, die Nummern der Schritte im Text.)

In den Schulbüchern geht man genau wie BERGMANN von folgender Kenntnis aus: Für die Wärmeabgabe ist die Größe der Oberfläche eines Körpers

maßgebend. Das Verhältnis von Oberflächeninhalt zu Volumen ist bei größeren Körpern kleiner als bei baugleichen kleinen Körpern. Die relative Wärme-

abgabe ist also bei einem größeren Körper geringer als bei einem baugleichen kleineren. BERGMANN nennt dies ein Gesetz. **(Schritt 1) [Schritte siehe Tab.2]**

Dieser Sachverhalt muss nun auf gleichwarme Organismen übertragen werden. Naiv betrachtet passen dann die großen Tiere besser in kalte Regionen der Erde, kleine Tiere in warme, weil die großen bezogen auf ihr Körpervolumen weniger Wärme abgeben als die kleinen. **(Schritt 1)**

Da aber Elefanten und Kolibris in denselben geographischen Breiten vorkommen, **(Schritt 2)** hat sich BERGMANN gefragt, unter welchen Bedingungen er diesen Transfer auf Lebewesen machen darf. Eine seiner Überlegungen ist die, dass Tiere Eigenschaften haben können, die die passive Wärmeabgabe kompensieren. „... betrachten wir etwas näher die Verteilung kleinerer und grösserer Homöothermen über die Erdoberfläche und im Meere, um zu sehen, wie weit sich in derselben Wirkungen unseres Gesetzes angedeutet finden, oder inwieweit dieselben durch den Reichthum an Hilfsmitteln verdeckt sind, so dass grosse Thiere in warmen, kleine Thiere in kalten Klimaten sich finden.“ (BERGMANN, 1848, S. 37). Eine solche Überlegung fehlt im Schulbuch. **(Schritt 4)**

Als Ergebnis formuliert BERGMANN: „Ein Blick auf die Landthiere zeigt uns aber die scheinbar widersprechendsten Verhältnisse. Die grössten Pachydermen in heissen Klimaten und nichts ihnen vergleichbares in kälteren, während kleine Thiere weit gegen die kalten Zonen hin wohnen, und, vielleicht das stärkste Beispiel davon, der Zaunschlüpfer selbst bis gegen die Polarzone hin überwintert.“ (BERGMANN, 1848, S. 37f.). Gemeint sind die Dickhäuter - ein heute nicht mehr gültiges Taxon - und der Zaunkönig. Erklärlich werden die scheinbaren Widersprüche, wenn man das Verhalten und einige physiologische Eigenschaften der Arten betrachtet. **(Schritt 4)**

BERGMANN erkennt, dass die Übertragung der physikalischen Vorgabe zur Wärmeabgabe größerer und kleinerer Körper auf gleichwarme Tiere nur dann dazu beitragen kann, deren Verteilung auf die unterschiedlich warmen Lebensräume zu begründen, wenn man Tiere vergleicht, die möglichst bau- und funktionsgleich sind. Seine Schlussfolgerung lautet:

„Wenn sich nun zwei Thierspecies fänden, welche durchaus nur in Hinsicht auf Grösse von einander verschieden wären, so wären damit alle jene Modificationen ganz und gar ausgeschlossen: die geographische Verbreitung dieser beiden Arten müsste relativ bestimmt sein durch ihre Grösse; welcher auch absolut genommen ihr Wohnort wäre, die kleinere müsste ein wärmeres, die grössere ein kälteres Klima fordern.“ (BERGMANN, 1848, S. 46). **(Schritt 5)**

BERGMANN zeigt beispielhaft, dass Faktorenkontrolle wichtig ist. Es bleibt also die Frage, welche Tiere lediglich in ihrer Grösse variieren. Da in der biologischen Systematik zu BERGMANNs Zeiten die Arten nach ihren anatomischen Ähnlichkeiten sortiert wurden, fand sich für ihn darin ein Ansatz, solche Arten zu finden: „Eine richtig erkannte zoologische Stel-

lung eines Thieres ist nun der Ausdruck für möglichst zahlreiche und wichtige Aehnlichkeiten mit den ihm zunächst geordneten Geschöpfen.“ (BERGMANN, 1848, S. 46). Genau diese Überlegung sollte auch in heutigen Schulbüchern ausgesprochen werden, wenn das beachtete Phänomen zur Größenvariation auf Arten oder Verwandtschaftskreise beschränkt betrachtet wird. **(Schritt 5)**

Und dennoch ist die Argumentation nicht schlüssig, wie auch BERGMANN festgestellt hat: „Vielleicht ist aber die Aehnlichkeit nirgends oder selten so gross. Unterscheiden sich nun die Species ausser der Grösse noch durch andere Eigenheiten der Organisation und Lebensweise, welche die Wärmebildung und Wärmeverluste mitbestimmen, somit das passende Klima mitbedingen, so können diese die Regelmässigkeit der geographischen Anordnung der Species, welche ohne sie Statt finden würde, auf verschiedene Weise stören.“ (BERGMANN, 1848, S. 46f.). Da BERGMANN hierzu Daten fehlten, konnte er nur abwägen, wie wahrscheinlich es ist, dass solche Unähnlichkeiten oder weiteren Eigenschaften bei nahe verwandten Arten vorkommen. Ohne Kenntnis der Evolutionsbiologie plädierte er für eine zufällige Gleichverteilung von Eigenschaften, die die Auswirkung der Körpergröße im Sinne der physikalischen Grundlagen entweder fördern oder hemmen. Falls es außerdem Arten gibt, bei denen keine zusätzlichen Faktoren für die Wärmeregulation bedeutend sind, wären die Fälle in der Mehrzahl, bei denen die größeren Individuen an kälteren Orten vorkommen, die kleineren an wärmeren. **(Schritt 8)**

BERGMANN erwägt außerdem, dass seine Überlegungen nicht exakt geprüft werden könnten. Die Daten über die Verbreitung und Körpermassen der verschiedenen Arten, die für ihn verfügbar sind, sind selten präzise. Lediglich zu den Vogelarten Deutschlands hat er eine gute Enzyklopädie zur Hand. **(Schritt 7)**

Da es außerdem bei den Vögeln häufiger als bei den Säugetieren mehrere Arten innerhalb einer Gattung gibt, nimmt er sich vor, seine Untersuchung auf Vögel zu beschränken. Sollte er dann allerdings herausfinden, dass seine Erwartung allzu häufig nicht erfüllt würde, wäre das Interesse an der weiteren Prüfung der Idee geschwächt, dass man nach der Wirkung des Faktors passive Wärmeabgabe im Tierreich systematisch auf diese Weise suchen sollte (siehe BERGMANN, 1848, S. 48f.). Ähnliche methodische Überlegungen sollten im Unterricht angesprochen werden. Auch heute ist die Datenlage nicht lückenlos und die größere Zahl der Abweichungen von der „Regel“ zwingt zu Einzelfallbetrachtungen. **(Schritt 8)**

Zusammenfassend ist festzustellen, dass BERGMANN folgende Hypothese vertritt: Bei nahe verwandten Arten sind in der Mehrzahl der Fälle die innere und äussere Organisation bezüglich der passiven Wärmeabgabe vergleichbar. Er weiß, dass er seine Hypothese nicht vollständig begründen kann, dass sie also lediglich plausibel ist. **(Schritt 5)**

Und dennoch hat er Erfolg: „Wir nahmen nicht das Klima, sondern die Organisation als festen Punkt,

und fanden, dass Thiere von möglichst ähnlicher Organisation den Einfluss der Grössenverhältnisse insoweit offenbaren, dass von den verschiedenen Arten einer Gattung häufiger die kleinern als die grössern empfindlicher gegen die Kälte sind und wärmere Wohnsitze haben.“ (BERGMANN, 1848, S. 90f.). **(Schritt 9)**

Er sieht allerdings die Verbreitung der Arten noch nicht als durch die zu Körpergröße passende passive Wärmeabgabe vollständig begründet an. Es kann nämlich sein, dass dies lediglich scheinbar so ist und andere Eigenschaften zu der passenden Körpergröße geführt haben (BERGMANN, 1848, S. 47f.). **(Schritt 10)** In der modernen Ökologie werden solche Erklärungen besprochen. Im zitierten Schulbuch werden sie angedeutet.

BERGMANNs Vorbehalte gegenüber seiner Hypothese müssen heute aus evolutionsbiologischer Sicht formuliert werden. Sein Argument, Merkmale könnten zufällig variieren, korrespondiert mit der Vorstellung, dass es evolutionsrelevante Zufälle gibt, zum Beispiel Mutationen. Dass nicht jede Mutation zu Merkmalsänderungen führt, macht den Sachverhalt komplexer. **(Schritt 11)**

Ein Fettpolster kann ökologisch und evolutionsbiologisch für das Überleben viel entscheidender sein als die Minimierung der passiven Wärmeabgabe, weil es gilt, eine nahrungsarme Zeit zu überstehen. Das Polster führt aber auch zu einer größeren Körpermasse, ist also ein modifiziertes oder sogar selektiertes Merkmal, das im Sinne der passiven Wärmeabgabe zu den niedrigen Außentemperaturen passt. Evolutionsbiologisch ist dies ein Beispiel für Exaptation. Solche Beispiele müssen im Unterricht bespro-

Zusammenstellung

Folgende Inhalte sind in einem naturwissenschaftlichen Unterricht zur BERGMANNschen Hypothese zwingend nötig.

Das beobachtete Phänomen zur Verteilung nahe verwandter Arten ist ein häufiger auftretendes Phänomen, keine Regel. Es wird als Korrelation formuliert. **(Problemgrund)**

Das Phänomen motiviert wegen seiner Auffälligkeit dazu, eine Hypothese zu den Ursachen zu suchen. **(Problem)**

Umgekehrt kann auch die Vermutung einer Ursache **(Problem)** für die variable Körpermasse ähnlicher Arten zu einer Hypothese über ihre Verbreitung führen.

Die physikalische Gesetzmäßigkeit zur relativen Wärmeabgabe bei vergleichbaren Körpern, die sich in Rauminhalt des Körpers und Körperoberflächeninhalt unterscheiden, gilt für alle Tiere, nicht nur für diejenigen eines Verwandtschaftskreises. Dieses Wissen führt auf die Frage nach den Ursachen für Ausnahmen vom beobachteten Phänomen. **(Zweites Problem)**

Unabhängig davon, welche Hypothese man verfolgt, muss diese Hypothese so gut wie möglich begründet werden. Die Grenzen dieser Begründungen müssen benannt und diskutiert werden. Hierzu sind

chen werden. Ein Hinweis reicht nicht aus. **(Schritt 11)**

Weitere Argumente

Von anderen Forschern wurden weitere Daten zur Größenvariation der Arten in Korrelation mit ihrer Verbreitung zusammengetragen. Bei der jahreszeitlichen Variation der Körpermasse ergab sich ein besonderes Phänomen. BRAULKE (2010) berichtet zum Forschungsstand: „Während die meisten größeren Säuger eine Gewichtszunahme durch die Anlage von Energiespeichern in Form von Fettdepots für die kalte, nahrungsarme Zeit zeigen, ist bei den meisten winteraktiven Kleinsäugetern, die weniger als 1 kg wiegen, ein gegenteiliges Phänomen zu beobachten [...]. [...] am Beispiel des saisondimorphen Dsungarischen Zwerghamsters [...] zeigt sich, daß die vermeintlich steigende Wärmeabgabe durch das ungünstigere Oberflächen-Volumen-Verhältnis bereits mit einer höheren Fellisolation kompensiert wird. Auf diese Weise sinkt der Gesamtenergiebedarf des Tieres durch die Reduktion des bei Kältebelastung zu erwärmenden Gewebes.“

Der geschilderte Sachverhalt widerspricht der allgemeinen Aussage aus dem zitierten Schulbuch, dass „große Tiere bei niedriger Außentemperatur im Vorteil“ sind. Außerdem zeigt er, dass eine gute Wärmedämmung genauso Ergebnis der Selektion sein kann wie eine höhere Körpermasse. Verallgemeinerungen, wie sie der Formulierung von Regeln und speziell der Erklärung der Klimaregel zu Grunde liegen, müssen also vorsichtig gehandhabt werden. **(Schritt 10)**

verschiedene Beispiele zur Variation der Thermoregulation vorzustellen und zu diskutieren. **(Hypothesenbildung)**

In jedem der beiden genannten Argumentationswege ist es entscheidend, dass verwandte Arten oder Individuen zu vergleichen sind. Daher ist es wichtig, das Thema „BERGMANNsche Hypothese“ evolutionsbiologisch zu betrachten. **(modernes Problem)**

Das argumentative Ringen, bei dem ein Kausalzusammenhang zu einer Korrelation erkannt werden soll, sollte als typisch für ökologische Fragen bewusst gemacht werden. Damit kann den Schülern ein Einblick in Theoriebildung gegeben werden (siehe NENTWIG, 2004). **(Bewertung von Lösungen)**

Alle Argumente sind auszuführen. Andeutungen und apodiktische Formulierungen sind wenig hilfreich.

Evolutionsbiologisch muss umsichtig argumentiert werden: Man darf nicht annehmen, dass durch Mutation und anschließende Selektion von Merkmalen, die für die Wärmeregulation bedeutend sind, das Merkmal Körpervolumen eher ausgelesen wird als andere Merkmale, nahe Verwandte sich also eher in der Körpergröße als in anderen der genannten relevanten Merkmale unterscheiden. Weshalb dann dennoch das beobachtete Phänomen häufig auftritt, ist eine nicht beantwortete Frage. Modifikation ist als

weiterer Erklärungsansatz wichtig, die genetische

Basierung der Merkmale muss geprüft werden.

3.2 Konkrete Anregungen

Hier folgen mit Bezug auf die genannten Forderungen konkrete Anregungen für den Unterricht. Sie sind nicht alle neu.

Physikalische Grundlagen zur Wärmeabgabe

Die physikalischen und physiologischen Argumente zur Wärmeabgabe und Wärmeproduktion sollten durch den Kartoffelversuch und die geometrische Darstellung des Verhältnisses von Oberflächeninhalt und Rauminhalt bei verschiedenen bauähnlichen Körpern untermauert werden. Die Allgemeingültigkeit sollte betont werden. **(Schritt 1)**

Physiologische Anwendbarkeit der Grundlagen

Die Übertragbarkeit dieses Zusammenhangs auf den Vergleich verschiedener Tiere wird dadurch plausibel, dass im Kalorimeter kleine Tiere einer Art pro Masseinheit mehr Wärme abgeben als größere und die kleineren auch mehr Nahrung zu sich nehmen. Hier müssen funktionell gleiche Tiere beachtet werden: Jungtiere wachsen noch stärker als ältere und dürfen deshalb nicht mit den älteren verglichen werden. **(Schritte 2 bis 5)**

Beispiele, die zur Regelmäßigkeit und ihrer Erklärung passen

KLEMMSTEIN (2015, S. 39f.) hat innerhalb einer Übungsaufgabe Material zu Körpermassen und Energieumsätzen bei nordamerikanischen Buschratzenarten zusammengestellt. Die wenigen, ebenfalls mit Daten belegten Ausnahmen weisen auf Untersuchungsbedarf hin. Aus den Ergebnissen kann erschlossen werden, dass die Tiere einer Art, die man untersucht hat und die in eine Reihung passen, wahrscheinlich baugleich sind und bezüglich Wärmeabgabe gleich funktionieren, dies aber eben nicht müssen. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Arten muss diskutiert werden. **(Schritte 9 und 10)**

Von der Regelmäßigkeit abweichende Beispiele

Säbelschnäbler in Europa zeigen zum Beispiel, dass nicht nur die Wärmeabgabe wichtig ist: „Es bestanden keine Unterschiede der Eiggröße, der Größe der frisch geschlüpften Jungvögel [der Säbelschnäbler] und der Entwicklung der Homoiothermie von Jungvögeln aus Norddeutschland und Südspanien, die als Anpassungen an die unterschiedlichen Klimabedingungen der jeweiligen Brutgebiete zu verstehen sind.“ (JOEST, 2006). JOEST fasst Merkmale zusammen, die stattdessen zu Erklärungen herangezogen werden können: Die Jungvögel im ungünstigen Klima des nördlichen Brutgebiets waren bemerkenswert tolerant gegenüber niedrigen Körpertemperaturen, wurden einen größeren Anteil des Tages von einem Altvogel gewärmt als diejenigen in Südspanien, und die längere Helligkeitsperiode ermöglichte ihnen eine teilweise Kompensation der witterungsbedingten Einschränkungen der für die Nahrungsu-

che nutzbaren Zeit. Im norddeutschen Wattenmeer konnten sie außerdem ihren Nahrungsbedarf in deutlich kürzerer Zeit decken. Dadurch entfielen zusätzliche energetische Kosten für die Thermoregulation. Letztlich waren die täglichen Energieausgaben der Jungvögel in Norddeutschland nicht höher als in Südspanien. Unterschiede der Wachstumsgeschwindigkeit waren nicht auf klimatische Unterschiede, sondern auf habitatspezifische Unterschiede der Nahrungsverfügbarkeit zurückzuführen. Die Umwelt eines Tieres bietet also mit Bezug auf die Wärmeregulation mehr als hauptsächlich niedrigere oder höhere Temperaturen. Im zitierten Schulbuch wurde dagegen lediglich der Einfluss verschiedener Faktoren auf die Körpergröße erwähnt.

Schon BERGMANN wusste, dass die Homoiothermen neben der passiven Wärmeabgabe andere Mechanismen haben, den Wärmehaushalt zu regulieren: „Wir können nicht ohne Bewunderung sehen, wie die Natur bei den Schranken, welche ihr der Zweck, eine bestimmte Temperatur zu erreichen, und den Bedingungen, welche ihr das Verhältniss zwischen cubischem Inhalte und Oberfläche auferlegen, dennoch eine so grosse Manchfaltigkeit von grossen und kleinen warmblütigen Thieren hat erzeugen können.“ (BERGMANN, 1848, S. 11) **(Schritt 4)**

Beispiele mit gegenläufigem Trend

Zur Veranschaulichung, dass die Vergrößerung der Körpermasse nicht mit geringeren Umgebungstemperaturen korrelieren muss, kann man auf die kleinen Säugetiere, insbesondere den Dsungarischen Feldhamster, verweisen.

Physiologische Daten werden von BUCHINGER (2008) aus der Fachliteratur zusammengefasst: Die jahreszeitliche Akklimatisation der kleinen Säuger beruht auf einer Verbesserung der Fähigkeit zur endogenen Wärmebildung. Der Dsungarische Zwerghamster kann im Sommer, im nicht akklimatisierten Zustand, Umgebungstemperaturen bis -20°C ertragen, im Winter bis -70°C . Seine Kapazität zur Wärmebildung steigt von 55 mWg^{-1} auf 90 mWg^{-1} an. Kältezittern setzt im Sommer bei etwa 0°C , im Winter erst bei -40°C ein. Die Kapazität zur zitterfreien Wärmebildung ist im Winter erhöht. Die jahreszeitliche Verbesserung der Thermogenese-Kapazität beruht auf massiver Mitochondriogenese im braunen Fettgewebe und einer verstärkten Expression aller Proteine, die an der Thermogenese beteiligt sind.

Das Beispiel begrenzt anschaulich die Basis für BERGMANNs Hypothese auf funktionsgleiche Individuen. Es fand bei den kleinen Säugern keine Selektion auf größere winterliche Körpermasse statt. Stattdessen kann die passende Wärmebildung durch intrazelluläre Änderungen wie Mitochondriogenese und Genexpression als Ergänzung zum Wachsen eines Winterfells als selektiertes Merkmal

vermutet werden. Weitere Beispiele könnten im Unterricht besprochen werden. **(Schritte 4 und 10)**

Zur Regelmäßigkeit passende Beispiele, die physiologisch und evolutionsbiologisch abweichend erklärt werden können - falsche Bestätigungen der Hypothese

Beim Grizzlybären wird diskutiert, dass bei den Tieren, die jedes Jahr Lachse fressen können, nicht allein die Anpassung an die passive Wärmeabgabe zu ihrer besonderen Körpergröße geführt hat. „The proportion of meat in the diet was significantly correlated with mean adult female body mass ($r = 0.87$, $P < 0.01$), mean litter size ($r = 0.72$, $P < 0.01$), and mean population density ($r = 0.91$, $P < 0.01$). Salmon was the most important source of meat for the largest, most carnivorous bears and most productive populations.“ (HILDERBRAND u. a., 1999, S. 132) Bezogen auf die Wärmeabgabe können sie sich bei niedrigen Außentemperaturen diese Modifikation der Körpermasse leisten, ohne den Wärmehaushalt zu sterben.

Weitere Erklärungen für eine größere Körpermasse in kalten Lebensräumen fasst JOEST (2006, S. 12) zusammen: Größere Tiere können überproportional länger von Körperreserven zehren, weshalb sie in höheren Breiten die auf Grund ungünstiger Witterungsbedingungen auftretenden Nahrungsengpässe besser überleben.

Die Bildung größerer Reserven korreliert mit einem größeren Ressourcenangebot und der geringeren Konkurrenz in höheren Breiten. Bei einer Untersuchung zu Zwergstrandläufern sahen die Autoren die größeren Körperreserven als Versicherung gegenüber Schlechtwetterperioden in nördlicheren Brutgebieten an. **(Schritt 10, Fußnoten 13 und 14)**

Wenn die Ausbildung der größeren Körpermasse als Anpassung an das reichliche aber unsichere Nahrungsangebot evolviert ist, muss die Passung der Körpermasse zur Verminderung der Wärmeabgabe als Exaptation diskutiert werden.

Als Einstieg in den Unterricht kann neben einem Beispiel, das die gewünschte Reihung zeigt, etwa die Braunbären oder die weltweit verbreiteten Wanderfalken, das oben angeführte BERGMANNsche Zitat als Problemgrund dienen. „Ja wie zum Spotte unserer Forschung finden wir die grössten mit den kleinsten warmblütigen Thieren des Festlandes in gleichen Breitengraden.“ (BERGMANN, 1848, S. 12). **(Schritt 2)**

Die Ausnahmen sind ökologisch spannend, die Bezeichnung *Regel* verdeckt diese Spannung. Dennoch harren sowohl das häufig auftretende Phänomen als auch die davon festzustellenden Ausnahmen einer evolutionsbiologischen Erklärung.

4 Abwägung

Die Beispiele zeigen, dass sich im Verlauf der Evolution verschiedene Merkmale zum Wärmehaushalt bewährt haben. Es ist also nicht sinnvoll, eines dieser Merkmale ohne Abwägung besonders herauszustellen. Die Suggestion, die in vielen Schulbüchern steht, das Volumen-Oberflächen-Verhältnis könne die Befunde zur Verteilung der Formen begründen, bedarf einer genaueren Untersuchung und nicht bloß einer einschränkenden Bemerkung. Am Ende der Betrachtungen bleibt eine mehrfach bestätigte Hypothese zur Verbreitung nahe verwandter Arten, die viele weitere Fragen aufwirft.

BERGMANNs Vorgehensweise hat das Potenzial, spannende Forschung nachzuerleben. Spannend wird es dadurch, dass die zu untersuchende Hypothese sorgfältig vorbereitet wird und dass die Ausnahmen von der „Regel“ nahtlos in die Argumentation

passen und nicht derart stören, wie es bei ihrer reinen Auflistung geschieht.

Spannend kann auch sein, dass alternative Erklärungen für das Phänomen ins Gespräch kommen und damit der Begriff *Regel* auf unterschiedliche Sachverhalte angewendet würde, was ihn begründet verbieten würde.

Die fachliche Verwirrung wird geringer, weil die naturwissenschaftliche Denk- und Arbeitsweise deutlich wird und der in der „Regel“ betrachtete Sachverhalt in eine schlüssige Argumentation eingebettet wird. Der Unterricht wird zwar umfangreicher, dafür wird das Denken weniger schematisch, und der Vergleich von „Regel“ und „Naturgesetz“ erübrigt sich. *BERGMANNsche Hypothese* ist ein guter Begriff. Daher ist es unverständlich, dass sich der Begriff „Regel“ so hartnäckig hält.

5 Impulse zum Weiterdenken

- In ähnlicher Weise sind die anderen ökologischen „Regeln“ als Hypothesen zu bezeichnen. Dann wird eine berechtigte Kritik an den Aussagen der „Regeln“ sachlicher, weil man keine Regel über Bord werfen muss. Die theoretische Abwägung zwischen Regel und Naturgesetz trifft nicht den Kern des vorliegenden ökologischen Problems und damit nicht den Kern irgendeines Forschungsinteresses.
- Das Begriffspaar Korrelation und Kausalität muss zwingend und explizit im Lehrplan Biologie stehen, vor allem in der Ökologie. Den Schülern muss Gelegenheit gegeben werden, eigenständig Korrelationen im Gelände zu erfassen. Das erfordert einen angemessenen Stundenumfang für das Fach Ökologie während der Vegetationsperiode.
- Die Selektionstheorie gehört in den Ökologieunterricht. Es ist günstig, den Begriff *Passung* zu verwenden und nicht vorschnell von *Anpassung*

zu reden, weil Exaptation zu Grunde liegen könnte. Ich schlage hiermit den Begriff Passung als unterrichtsrelevant vor. Wichtig bleibt dabei die Frage, wie man die Wirkung eines möglichen Selektionsfaktors testet. In einigen Bundesländern, wie z. B. in NRW, müssten entsprechende Themen neu verteilt werden.

- Exaptation ist auch bei den Frühblüherern im Laubwald zu beachten, um schematischem Denken hinsichtlich der Anpassung an die Lichtverhältnisse im Wald entgegen zu wirken. Angepasstsein an Sommertrockenheit ist bei einigen Arten ebenfalls möglich.

Anmerkung: Die Fußnoten folgen hinter dem Literaturverzeichnis.

6 Literatur

- BERGMANN, Carl (1848): *Über die Verhältnisse der Wärmeökonomie der Thiere zu ihrer Größe*. Göttingen: Vandenhoeck und Ruprecht Online verfügbar unter: URL: http://archive.org/details/bub_gb_EHo-AAAACAAJ [02.10.2018]
- BRAULKE, Luzie (2010): Regulation des Energiehaushalts von Kleinsäugetern unter besonderer Berücksichtigung saisonaler Stoffwechseladaptionen des Dsungarischen Zwerghamsters, *Phodopus sungorus*. Online verfügbar unter: URL: <http://archiv.ub.uni-marburg.de/diss/z2010/0757> [03.10.2018]
- BUCHINGER, Elisabeth (2008): *Der Einfluss der Umgebungstemperatur auf den Energieumsatz Dsungarischer Zwerghamster (Phodopus sungorus) während der Laktation*. Online verfügbar unter: URL: <http://media.obvsg.at/AC05036935-2001> [03.10.2018]
- HILDERBRAND, G V, SCHWARTZ, C C, ROBBINS, C T, JACOBY, M E, HANLEY, T A, ARTHUR, S M, SERVHEEN, C (1999): The importance of meat, particularly salmon, to body size, population productivity, and conservation of North American brown bears. *Canadian Journal of Zoology*, 77 (1), S. 132–138 Online verfügbar unter: URL: <https://doi.org/10.1139/z98-195>
- JOEST, Ralf (2006, 7. Juli): *Junge Säbelschnäbler (Recurvirostra avosetta L.) in unterschiedlichen Klimazonen : physiologische und ethologische Anpassungen an ökologische Bedingungen in Norddeutschland und Süds Spanien*. Christian-Albrechts Universität Kiel, CAU Kiel, doc-type:doctoralThesis Online verfügbar unter: URL: https://macau.uni-kiel.de/receive/dissertation_diss_00000807 [03.10.2018]
- KLEMMSTEIN, Wolfgang (2015): Globale Erwärmung lässt Tiere schrumpfen. Unterrichtsmodell Sekundarstufe II. *Unterricht Biologie, Friedrich Verlag, Seelze*, 39. Jg. (407), S. 37–43
- MINISTERIUM FÜR SCHULE UND WEITERBILDUNG DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN (Hrsg.) (2014): *Kernlehrplan für die Sekundarstufe II Gymnasium/Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen Biologie*.
- NENTWIG, Wolfgang (Hrsg.) (2004): *Ökologie*. (1. Aufl.). Heidelberg Berlin: Spektrum, Akad. Verl
- SEDLAG, Ulrich (1995): *Tiergeographie*. (1. Aufl.). Leipzig: Urania-Verl.
- WEBER, Ulrich (Hrsg.) (2015): *Biologie Oberstufe: Gesamtband S II. ... Schülerband*. (3. neubearbeitete Auflage, [Allgemeine Ausgabe]). Berlin: Cornelsen

Martin POST war Lehrer für Mathematik und Biologie und Fachleiter für Biologie in Arnsberg, NRW; martin@postfamily.de

-
- i Nun vergrößern oder vermindern sich ja der cubische Inhalt von Körpern und die Ausdehnung ihrer Oberfläche nicht nach demselben Verhältnisse, sondern, wenn wir die einzelnen Dimensionen eines Körpers z. B. sämmtlich im Verhältnisse von 1 zu 2 vergrößern, so wächst die Oberfläche von 1 zu 4 und der cubische Inhalt von 1 zu 8. (S. 9)
 - ii Die Oberfläche ist ein einfacher und genau zu ermittelnder Factor für die Wärmeverluste, dessen Werth, zusammen genommen mit der Beschaffenheit dieser Oberfläche (Bedeckung mit Haaren u. s. w.), der Differenz zwischen Temperatur des Thieres und des umgebenden Mediums und Beschaffenheit dieses Mediums (ob es Luft oder Wasser ist) die Wärmeverluste bestimmt. Das Volumen des Thieres dagegen wird als ein Maass für die mögliche Wärmebildung betrachtet werden können. Gewiss ist in gleichem Volumen sowohl verschiedener Thiere als auch des selben Thieres zu verschiedener Zeit die Wärmebildung sehr verschieden. (S. 9).
 - iii Es ist also entschieden, dass die Thiere, je grösser sie sind, um so weniger Wärme im Verhältniss zu ihrer Grösse zu bilden brauchen, um eine gewisse Erhöhung ihrer Temperatur über die der Umgebung zu gewinnen. (S. 9)
 - iv „Dieses Gesetz muss von grossem Einflusse auf die Lebensweise der warmblütigen Thiere sein.“(S. 9) und „Ja wie zum Spotte unserer Forschung finden wir die grössten mit den kleinsten warmblütigen Thieren des Festlandes in gleichen Breitengraden.“(S. 12)
 - v Die Wandelbarkeit [...] der relativen Wärmeentbindung[,] muss auf Qualität und Quantität der Nahrung beruhen[...]. [...] viel schwieriger für bestimmte Thiere auf bestimmten Ausdruck zu bringen[,] sind die verschiedenen Bedingungen der Wärmeableitung: Hautwärme und Verdunstung, Beschaffenheit des Pelzes u. s. w., Klima, Lebensweise innerhalb desselben, Medium, in welchem sich die Thiere aufhalten.(S. 31)
 - vi Wir sehen die Möglichkeit sehr verschiedener Grössen homöothermer Thiere in einem und demselben Klima; diese Möglichkeit ist bedingt durch die Veränderlichkeit der Factoren der Wärmebildung und derjenigen der Ableitung [...]S. 46
 - vii Wenn sich nun zwei Thierspecies fänden, welche durchaus nur in Hinsicht auf Grösse von einander verschieden wären, so wären damit alle jene Modificationen ganz und gar ausgeschlossen: die geographische Verbreitung dieser

beiden Arten müsste relativ bestimmt sein durch ihre Grösse; welcher auch absolut genommen ihr Wohnort wäre, die kleinere müsste ein wärmeres, die grössere ein kälteres Klima fordern. (S.46)

- viii Eine richtig erkannte zoologische Stellung eines Thieres ist nun der Ausdruck für möglichst zahlreiche und wichtige Aehnlichkeiten mit den ihm zunächst geordneten Geschöpfen. (S. 46)
- ix Gäbe es nun Genera, deren Species sich so weit als möglich (eine Beschränkung dieser Möglichkeit ist im Anhänge angedeutet) nur durch die Grösse unterschieden, so würden die kleinen Arten derselben durchweg ein wärmeres Klima fordern und zwar nach einem aus der Grössendifferenz genau bestimmten Maasse. (S.46)
- x Vielleicht ist aber die Aehnlichkeit nirgends oder selten so gross. Unterscheiden sich nun die Species ausser der Grösse noch durch andere Eigenheiten der Organisation und Lebensweise, welche die Wärmebildung und Wärmeverluste mitbestimmen, somit das passende Klima mitbedingen, so können diese die Regelmässigkeit der geographischen Anordnung der Species, welche ohne sie Statt finden würde, auf verschiedene Weise stören. (S. 46f.)
- xi Einem Unternehmen dieser Art stehen nun aber bedeutende Hindernisse entgegen, der Werth der Thatsachen, mit welchen man zu arbeiten hat, ist ein sehr bedingter.
Die Thatsachen, welche zu Grunde liegen müssen, sind: genaue Angaben über die Grösse, über die geographische Verbreitung und über die Zugzeit.
Ueber den ersten Punkt findet man nun besonders selten Angaben in den naturhistorischen Schriften einigermaassen consequent gesammelt.
Das grosse Naumannsche Werk über die Vögel Deutschlands giebt indessen durchgängig einige Dimensionen der Vögel, namentlich die Flugbreite und die Länge. Häufig sind auch noch andere Bemerkungen beigebracht: ob der Vogel im Verhältnisse zu diesen, durch das Gefieder mit bedingten, Dimensionen klein oder gross sei; die Arten einer Gattung werden untereinander verglichen, hin und wieder auch Gewichte angegeben u. s. w., kurz wir finden in diesem ausgezeichneten Werke ein so reichliches Material für diesen Punkt, als man nur immer erwarten kann, wo für deren Zusammenstellung nicht einmal ein so specieller Zweck, wie der unsre, vorlag.
Desshalb habe ich dieses Werk zu Grunde gelegt ... (S. 49)
- xii „Wir nahmen nicht das Klima, sondern die Organisation als festen Punkt, und fanden, dass Thiere von möglichst ähnlicher Organisation den Einfluss der Grössenverhältnisse insoweit offenbaren, dass von den verschiedenen Arten einer Gattung häufiger die kleinern als die grössern empfindlicher gegen die Kälte sind und wärmere Wohnsitze haben.“(S.90f.)
- xiii Vielleicht ist aber die Aehnlichkeit nirgends oder selten so gross. Unterscheiden sich nun die Species ausser der Grösse noch durch andere Eigenheiten der Organisation und Lebensweise, welche die Wärmebildung und Wärmeverluste mitbestimmen, somit das passende Klima mitbedingen, so können diese die Regelmässigkeit der geographischen Anordnung der Species, welche ohne sie Statt finden würde, auf verschiedene Weise stören.
Es ist von Wichtigkeit bei diesen möglichen Störungen (welche auf Nahrung, Hautbedeckung, Lebensweise beruhen) zwei Fälle zu unterscheiden.
Die Organisationsverschiedenheiten, auf welchen dieselben beruhen, könnten nämlich entweder (sämmtlich oder theilweise) unter den Species jedes Genus nach einem Principe vertheilt sein, welches sich ebenfalls an die Grösse knüpfte, oder sie könnten von der Grösse ganz unabhängig sein. (S. 46f.)
- xiv Es ist dabei selbst denkbar, dass Verschiedenheiten, welche sich an die Grösse knüpfen, theilweise die grössern, theilweise die kleinern Arten begünstigen und so einander wieder aufheben, dass nur die Wirkung des Zufalls neben derjenigen des constanten Factors des Verhältnisses vom Volumen zur Oberfläche bemerkbar wird. (S.48)
- xv So wenig es möglich ist, das ganze in dieser Beziehung vorgelegte Material zu benutzen und mit bestimmten Werthen in Rechnung zu bringen, so sehr eine feinere mathematische Behandlung an diesem Stoffe verschwendet erscheinen würde, so glauben wir doch die ausgesprochene Behauptung durch folgende Bemerkungen immer schon hinreichend begründen zu können. (S. 91)
- xvi Es mag hier endlich noch wiederholt werden, dass in mehreren Fällen von Abnormitäten wir nicht darauf beschränkt waren, dieselbe als vorhanden anzuzeigen, sondern zugleich die Ursache oder wenigstens eine Ursache mit Wahrscheinlichkeit angeben konnten. So bei den Somateria das wahrscheinlich bessere Gefieder der *S. spectabilis*, bei den Nachttrihern das anscheinend weniger warme Kleid von *A. nycticorax*. Bei andern war es wohl eine besondere Gefrässigkeit kleinerer Arten u. s. w. (S. 94)
- xvii Somit muss jede gewissenhafte Nachprüfung erwünscht sein. (S. 95)