

Stefan T. Hertwig

# Auf Humboldts Spuren: Zoologische Expeditionen und Entdeckungen im 21. Jahrhundert

in: *Alexander von Humboldt – Wissenschaften zusammendenken*, hgg. im Auftrag des Collegium generale von Sara Kviat Bloch, Oliver Lubrich und Hubert Steinke. Bern: Haupt Verlag 2021 (Berner Universitätsschriften 62), S.245-278.

BERN OPEN PUBLISHING  
UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK BERN  
DOI: 10.36950/BUS.62.10



# **Auf Humboldts Spuren: Zoologische Expeditionen und Entdeckungen im 21. Jahrhundert**

*Stefan T. Hertwig*

Alexander von Humboldt war ein herausragender und im Kontext seiner Zeit moderner Wissenschaftler, der bei seiner Arbeit hohen wissenschaftlichen Standards verpflichtet war. Unbestritten ist seine bis heute wirkende Strahlkraft als der Empirie verpflichteter Forscher, der seine Motivation aus Wissensdurst und Abenteuerlust schöpfte, die er jedoch in akribischer wissenschaftlicher Arbeit domestizierte. Im folgenden Beitrag dient Humboldt als Referenz für eine Schilderung des gegenwärtigen Standes und der aktuellen Herausforderungen bei der Erforschung der Vielfalt des Lebens. Anhand aktueller Forschungsergebnisse aus der Arbeit des Verfassers, insbesondere über die Evolution der Amphibien in Südostasien, werden Entwicklungen, Erfolge, aber auch Herausforderungen der Biodiversitätsforschung im 21. Jahrhundert diskutiert. Vor allem soll der Frage nachgegangen werden, warum Forschungsreisen und Feldarbeit 250 Jahre nach Humboldts Geburt nach wie vor notwendig sind und welche Bedeutung naturwissenschaftlichen Sammlungen bei der Erforschung der Erde spielen.

## **Biodiversitätsforschung**

Biodiversitätsforschung als empirische Wissenschaft ist ein Überbegriff für die Erfassung der realen Artenvielfalt (Taxonomie), für die Rekonstruktion der Verwandtschaft der Organismen (Systematik) und für die Entschlüsselung der Entstehung dieser Vielfalt (Evolutionsbiologie). Dazu gehört auch die Untersuchung der Verbreitungsmuster der Arten und deren historischer Entstehung (Biogeografie) sowie der wechselseitigen Beziehungen der Arten untereinander und mit ihrer Umwelt (Ökologie).

Taxonomie und Systematik schaffen als primäre Biodiversitätsforschung durch die Identifizierung, Benennung und Kategorisierung des Lebens die Grundlage für alle anderen Zweige der wissenschaftlichen Arbeit mit Organismen. Sie liefern eine eindeutige Benennung und Beschreibung der Arten sowie ihrer Abstammung und Verwandtschaftsbeziehungen und damit das

nomielle und historische Bezugssystem für alle Biowissenschaften. In der Biologie sind Arten in der Regel die Einheit des Untersuchungsgegenstandes. Ohne eine formelle wissenschaftliche Beschreibung der Arten und ihrer Merkmale ist deren korrekte Identifizierung in anderen Bereichen der Grundlagenforschung oder in angewandten Wissenschaften nicht möglich. Allerdings hatten Taxonomie und Systematik lange und nicht ganz zu Unrecht den angestaubten Ruf, von der Interpretation, ja dem Bauchgefühl, der WissenschaftlerInnen abhängig zu sein. Heute gelten aber auch hier die Regeln moderner Naturwissenschaften. Es existieren verbindliche und im *peer review* überprüfte Standards für die Beschreibung von Arten. Methoden für die Rekonstruktion der Stammesgeschichte sind etabliert. Belegexemplare in wissenschaftlichen Sammlungen, die Publikation der Forschungsergebnisse in Fachzeitschriften sowie allgemein zugängliche Datenbanken sichern die Nachvollziehbarkeit der Resultate und Schlussfolgerungen.

Auch nach Jahrhunderten der Forschung in allen Teilen der Welt ist die Vielfalt des Lebens auf der Erde bis heute nur unzureichend bekannt, und das obwohl bereits ein grosser Teil der Lebensräume durch den Menschen beeinflusst, tiefgreifend verändert oder gar zerstört wurde. Aktuelle Hochrechnungen, die unter anderem auf Raten der Neubeschreibung bislang unbekannter Arten beruhen, schätzen die Gesamtzahl der Organismen auf zwischen etwa zwei Millionen und eine Billion ( $10^{12}$ ) Arten.<sup>112</sup> In den besonders hohen Schätzungen entfallen die meisten Arten auf Bakterien, aber allein die Insekten werden auf bereits 6,6 Millionen Arten geschätzt.<sup>113</sup> Vermutlich leben knapp zehn Millionen Tier- und Pflanzenarten auf unserem Planeten, lässt man die Bakterien und Archebakterien aussen vor. Demgegenüber steht die viel geringere Zahl der wissenschaftlich beschriebenen Arten, die auf etwa

---

112 Camilo Mora, Derek P. Tittensor, Sina Adl et al., «How Many Species Are There on Earth and in the Ocean?», in: *PLOS Biology* 9:8 (2011), S. 1–8; Brendan B. Larsen, Elizabeth C. Miller, Matthew K. Rhodes et al., «Inordinate Fondness Multiplied and Redistributed: the Number of Species on Earth and the New Pie of Life», in: *The Quarterly Review of Biology* 9:3 (2017), S. 229–265; Mark J. Costello, Simon Wilson und Brett Houlding, «Predicting total global species richness using rates of species description and estimates of taxonomic effort», in: *Systematic Biology* 61:5 (2012), S. 871–883; Kenneth J. Locey und Jay T. Lennon, «Scaling laws predict global microbial diversity», in: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113:21 (2016), S. 5970–5975.

113 Nigel E. Storka, James McBrooma, Claire Gely et al., «New approaches narrow global species estimates for beetles, insects, and terrestrial arthropods», in: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112:24 (2015), S. 7519–7523.

1,5 bis 2 Millionen geschätzt wird. Hier bleibt für BiodiversitätsforscherInnen, die sich für Feldarbeit interessieren, also noch viel zu tun! Angesichts der immer schneller fortschreitenden Zerstörung natürlicher Lebensräume und der wachsenden menschlichen Population ist allein die Erfassung und Dokumentation der Artenvielfalt ein Wettlauf gegen die Zeit.

Die heutige Feldarbeit unterscheidet sich von der Forschung zu Humboldts Zeit im Wesentlichen durch die verbesserten technischen Möglichkeiten für Kommunikation, Reisen und Dokumentation. Oft wird heute über eine überbordende Bürokratie geklagt, jedoch musste bereits Humboldt vor Antritt seiner Reisen um Empfehlungen, Begleitbriefe und Genehmigungen diverser Autoritäten ersuchen. Eine grössere Rolle spielt heute in jedem Fall die globale Vernetzung der WissenschaftlerInnen in internationalen Kooperationen. Noch immer ist jedoch die sorgfältige, mühevoll dokumentierte der gesammelten Daten und Beobachtungen die wichtigste Aufgabe der Forscher. Wie zu Humboldts Zeit ist zudem das Sammeln von Belegmaterial und der Aufbau von wissenschaftlichen Sammlungen unverzichtbar (siehe Abbildung 1). Serien der Organismen in Sammlungen dokumentieren die Variabilität innerhalb und zwischen Populationen und Arten. Das in Sammlungen aufgenommene Material dient später als Grundlage für molekulargenetische, biochemische und morphologische Untersuchungen. Dem heutigen Stand der Wissenschaft entsprechen integrative Forschungsansätze zur Artabgrenzung oder Verwandtschaftsanalyse, welche die verschiedensten Merkmale der Organismen angemessen berücksichtigen. Dabei werden neben möglichst vielen Markern des Genoms auch Merkmale des Körperbaus, der Bioakustik, des Verhaltens und der Ökologie berücksichtigt. Den Anforderungen an diese modernen Methoden muss bereits im Feld Rechnung getragen werden, beispielsweise durch separate Gewebeproben für spätere Laboruntersuchungen.



Abbildung 1: Exemplare verschiedener Froscharten in der Sammlung des Naturhistorischen Museums Bern.

## Biodiversität

Die Artenvielfalt ist sehr ungleich auf der Erde verteilt. Unwirtliche Regionen wie die Arktis und die Antarktis werden nur von wenigen Arten bewohnt, andere Gebiete, überwiegend in den subtropischen und tropischen Regionen, sind dagegen regelrechte Hotspots der Biodiversität. Einer dieser globalen Biodiversitäts-Hotspots ist Sundaland, zu dem neben der Malaiischen Halbinsel die grossen Sundainseln Borneo, Sumatra und Java sowohl zahlreiche kleinere umliegende Inseln gehören. Geologisch sind diese Inseln, die heute durch ein flaches Meer voneinander getrennt sind, Teile des namensgebenden *Sunda Shelves*, des südöstlichen Teils des asiatischen Kontinentalsockels. Das Aufeinandertreffen mehrerer tektonischer Platten an den Grenzen Sundalands ist verantwortlich für die komplexe geologische Geschichte der Region.<sup>114</sup> Die heutigen Küstenlinien Sundalands sind relativ jung, Borneo zum Beispiel wurde erst vor weniger als fünf Millionen Jahren als Insel vom Kontinent abgetrennt. Das in Äquatornähe im Vergleich zu höheren Breitengraden relativ stabile Klima ermöglichte die Anpassung und Differenzierung der Arten über einen längeren Zeitraum ohne derart dramatische Unterbrechungen wie den ausgeprägten Eiszeiten in Europa. Die wiederholten Schwankungen des globalen Klimas im Verlauf der Erdgeschichte beeinflussten jedoch auch die Lebensgemeinschaften in Sundaland durch Schwankungen von Tempera-

<sup>114</sup> Robert Hall, «The palaeogeography of Sundaland and Wallacea since the Late Jurassic», in: *Journal of Limnology* 72 (2013), S. 1–17.

turen und Niederschlägen, Veränderungen der Meeresströmungen und der Höhe des Meeresspiegels, was letztendlich die Verbreitung von Vegetationstypen wie Regenwald und Savanne beeinflusste. Der ausserordentlich hohe Artenreichtum Sundalands, der heute in zahlreichen Pflanzen- und Tiergruppen zu finden ist, wird auch als das Ergebnis dieser ausserordentlich komplexen geologischen und klimatologischen Geschichte interpretiert.<sup>115</sup> Die ereignisreiche Erdgeschichte Sundalands und der angrenzenden Regionen schuf immer neue ökologische Nischen sowie Verbindungen oder Barrieren zwischen Lebensräumen und damit letztlich neue Möglichkeiten zur Entstehung neuer Arten durch räumliche Trennung und Anpassung.<sup>116</sup> Nicht zuletzt scheinen die besonders nährstoffarmen Böden, die insbesondere auf Borneo weit verbreitet sind, zur Entstehung derart zahlreicher Arten durch ausgeprägte Konkurrenz um begrenzte Ressourcen beigetragen zu haben.

Die so entstandene immense Artenvielfalt stellt nach wie vor eine besondere Herausforderung für die Forschung dar. Erst intensive Feldarbeit und systematische Sammeltätigkeit auch in entlegenen und nach wie vor schwer zugänglichen Gebieten ermöglichten die Entdeckung der zahlreichen Arten, die bis heute von Sundaland bekannt geworden sind. Bei der Erforschung der Amphibien spielte insbesondere der leider kürzlich verstorbene amerikanische Herpetologe und Kurator am Field Museum Chicago Robert F. Inger (1920–2019) eine herausragende Rolle. Er leistete in über 50 Jahren unermüdlicher Feldarbeit auf Borneo einen entscheidenden Beitrag zur Kenntnis der Amphibienfauna dieser Region. Seine Leistung muss vor dem Hintergrund gewürdigt werden, dass in tropischen Regionen die Erfassung der tatsächlich vorhandenen Artenvielfalt nicht nur durch deren Ausmass, sondern auch durch die schwierige Zugänglichkeit vieler Regionen erschwert wird. Nach wie vor existieren selbst von vielen Nationalparks keine einigermaßen vollständigen Inventare der vorhandenen Tier- und Pflanzenarten. Für das landschaftlich besonders eindrucksvolle Maliau Basin Schutzgebiet im Norden Borneos beispielsweise wurde erst 2018 eine erste Publikation über die Froschfauna veröf-

---

115 Erik Meijaard, *Solving mammalian riddles. A reconstruction of the Tertiary and Quaternary distribution of mammals and their palaeoenvironments in island South-East Asia*, Dissertation, School of Archaeology and Anthropology, The Australian National University Canberra, 2004.

116 Jonathan Adams, *Species richness. Patterns in the diversity of life*, Berlin: Springer 2010.

fentlicht.<sup>117</sup> Als einzige Region ist der Kinabalu Nationalpark mit dem Mount Kinabalu als höchster Berg Südostasiens gut dokumentiert.<sup>118</sup>

Auch eine Reihe besonderer biologischer Phänomene verkomplizieren die Biodiversitätsforschung in den Tropen. Mikroendemiten sind Arten, die nur in winzigen Verbreitungsgebieten vorkommen. Auf Borneo, immerhin der drittgrößten Insel der Welt, wurde der Engmaulfrosch *Kalophrynus nubicola* bislang nur in der Gipfelregion eines einzelnen isolierten Berges, des Gunung Mulu, oberhalb von 1800 Metern gefunden. In diesem begrenzten Areal ist er nicht selten, ihn zu suchen kann jedoch vollkommen zurecht als eines der frustrierendsten Erlebnisse im Leben eines Herpetologen bezeichnet werden. Der Frosch ist klein, braun, lebt in der unendlichen Schicht aus Moos, Laub und Wurzeln am Boden der Bergregenwälder. Und stets hört er auf zu rufen, wenn sich ein möglicher Fänger auf wenige Meter dem im Verborgenen rufenden Frosch nähert. Der Autor war während drei Wochen nicht in der Lage, auch nur einen dieser Engmaulfrosche zu fangen.

Ein anderer Mikroendemit ist die winzige Kröte *Pelophryne linanitensis*, die bislang lediglich auf dem Bukit Linanit nachgewiesen wurde. Dabei handelt es sich um eine Bergspitze auf dem Hauptkamm des Bergmassivs des Gunung Murud. Dort bewohnt sie ausschliesslich die oberste Vegetationszone, einen niedrigen, von Heidekrautgewächsen geprägten Nebelwald. Aufgrund der dort oft herrschenden Winde, der heftigen Niederschläge und des Fehlens hoher Bäume lebt diese Art in Bodennähe und hat kürzere Beinchen im Vergleich zu ihren nächsten Verwandten. Die nah verwandte Art *P. murudensis* lebt auf den Bäumen der tieferen Höhenlagen direkt unterhalb des Bukit Linanit. Diese beiden Beispiele illustrieren die hochgradigen Anpassungen der Mikroendemiten an bestimmte, kleinräumige Habitate, die wohl nur aufgrund der relativen Stabilität der Lebensbedingungen in den Tropen entstehen konnten. Grundsätzlich könnten künftig manche dieser Mikroendemiten natürlich noch in anderen Gebieten mit ähnlichen Lebensbedingungen gefunden werden, sicher jedoch wird es sich um extrem seltene Arten

---

117 Alexander Haas, Kueh Boon-Hee, Stefan T. Hertwig et al., «An updated checklist of the amphibian diversity of Maliau Basin Conservation Area, Sabah, Malaysia», in: *Evolutionary Systematics* 2 (2018), S. 89–114.

118 Rudolf Malkmus, Ulrich Manthey, Gernot Vogel et al., *Amphibians and Reptiles of Mount Kinabalu*, Rugell: Gantner 2002.

handeln. In jedem Fall ist jedoch intensive, systematische und engmaschige Feldarbeit erforderlich, um derartige Spezialisten in ihren winzigen und oft schwer zugänglichen Verbreitungsgebieten aufzuspüren.

*Abbildung 2:* Ansammlung strömungsliebender Larven von *Huia cavitympanum* und einigen heller gefärbten *Meristogenys* sp. Die Kaulquappen haben sich mit ihren grossen Bauchsaugnäpfen am Felsen festgesaugt. Bukit Kanaa Nationalpark, Sarawak, Malaysia.



Der Begriff Biodiversität bezieht sich nicht nur auf die blosse Zahl der Arten. Auch die Vielfalt der Lebensformen und ihrer besonderen Anpassungen ist in den Tropen und Subtropen meist grösser als in den Lebensräumen höherer Breitengrade. Der Lebenszyklus der Frösche besteht im Prinzip aus zwei Phasen: der im Wasser lebenden Larve und dem meist an Land lebenden Frosch. Nur der Frosch entwickelt reife Geschlechtsorgane und pflanzt sich fort. Frösche und ihre Larven unterscheiden sich in Körperbau und Ernährung sehr deutlich voneinander, sie nutzen daher vollkommen verschiedene Ressourcen. Während die Kaulquappen der in Europa heimischen Arten alle mehr oder weniger ähnlich aussehen, gibt es in den Tropen völlig unterschiedliche Larventypen. Auf Borneo leben zum Beispiel die kleinen Frösche der Gattung *Leptobranchella*, deren Larven einen wurmförmigen Körper und weitgehend reduzierte Augen haben. Mit ihrem besonders beweglichen Kopf können sie sich zwischen den Kieselsteinchen tief im Untergrund kleiner Bäche fortbewegen oder im groben Sand graben. Für diese spezielle Lebensweise sind in ihrem Skelett Anpassungen bei den ersten Wirbelkörpern und im Schwanz entstanden.<sup>119</sup> Die Larven der zu den Echten Fröschen gehörenden Gattun-

---

119 Alexander Haas, Stefan Hertwig und Indraneil Das, «Extreme tadpoles: The morphology of the fossorial megophryid larva, *Leptobranchella mjobergi*», in: *Zoology* 109 (2006), S. 26–42.



gen *Huia*, *Meristogenys* und der erst kürzlich beschriebenen *Sumaterana* hingegen sind stromlinienförmig und abgeflacht, um wenig Widerstand in starker Strömung zu bieten (siehe Abbildung 2). Zudem besitzen sie als Ergänzung des breiten Saugmauls grosse Saugnäpfe am Bauch.<sup>120</sup> Modifizierte Muskeln des Kopfes und des Bauches erzeugen an diesen Saugnäpfen einen Unterdruck, der sogar ein Festhalten an Felsen in Wasserfällen und das zeitweise Verlassen des Wassers ermöglicht (siehe Abbildung 2).<sup>121</sup> Obwohl erst die Kenntnis der Larve und damit des gesamten Lebenszyklus das volle Verständnis der Ökologie einer Froschart ermöglicht, sind die Kaulquappen vieler Arten Borneos noch unbekannt. Erst die heute übliche Anwendung des genetischen Barcodings, bei dem ein auf Artniveau spezifischer DNA-Marker als Barcode zur Identifizierung verwendet wird, ermöglichte eine einfache und sichere Zuordnung von Kaulquappe und Frosch. Eine Aufzucht der Larven ist langwierig und scheitert meist an den bei der Feldarbeit verfügbaren Bedingungen, die den Anforderungen der oft empfindlichen Tiere nicht entsprechen.

### Verborgene Vielfalt

Ein weiteres Phänomen, welches insbesondere in den Biodiversitäts-Hotspots der Erde häufig vorkommt, sind sogenannte kryptische Arten. Darunter versteht man Arten, die sich äusserlich nicht oder zumindest nicht auf den ersten Blick unterscheiden, jedoch deutliche genetische Unterschiede aufweisen. Die Entschlüsselung dieses dem menschlichen Auge zunächst verborgenen Teils der Biodiversität wurde erst durch Analysen genetischer Daten möglich. Vor der Verfügbarkeit von Polymerase-Kettenreaktion und DNA-Sequenzierung wurden solche einander ähnlichen Arten als Angehörige einer einzigen Art betrachtet, da sie deren typische morphologische Merkmale zu teilen scheinen. Heute sind aus den unterschiedlichsten Organismengruppen ganze Komplexe solcher kryptischen Arten bekannt.<sup>122</sup> Oft leben diese in getrennt-

120 Li Lin Gan, Stefan T. Hertwig und Alexander Haas, «*The anatomy and structural connectivity of the abdominal sucker in the tadpoles of *Huia cavitympanum*, with comparisons to *Meristogenys jerboa* (Lissamphibia: Anura: Ranidae)*», in: *Journal of Zoological Systematics and Evolutionary Research* Volume 54:1 (2016), S. 1–81.

121 Umilaela Arifin et al., «*Molecular phylogenetic analysis of a taxonomically unstable ranid from Sumatra, Indonesia, reveals a new genus with gastromyzophorous tadpoles and two new species*», in: *Zoosystematics and Evolution* 94:1 (2018), S. 163–193.

122 Peter Trontelj und Cene Fišer, «*Perspectives: Cryptic species diversity should not be trivialised*», in: *Systematics and Biodiversity* 7:1 (2008), S. 1–3.

ten geografischen Verbreitungsgebieten, sie können jedoch auch im gleichen Areal vorkommen. Räumlich getrennte Vorkommen werden als allopatrisch bezeichnet, Vorkommen im gleichen Gebiet als sympatrisch. Kommen zwei Arten direkt im selben Lebensraum (Biotop) vor, nennt man das syntop.

Ein besonders eindrucksvolles Beispiel dafür, wie umfangreich solche Komplexe kryptischer Arten sein können, sind die Frösche der in Südostasien weit verbreiteten *Limnonectes kuhlii*-Gruppe. Da es sich um braune Frösche mit recht ungeschlechter Erscheinung handelt, werden sie von den mit ihnen arbeitenden WissenschaftlerInnen mehr oder weniger liebevoll «ugly, brown frogs» genannt (siehe Abbildung 3). Auf Borneo sind diese Frösche praktisch in allen einigermassen naturnahen Lebensräumen zu finden. Vom Meeresspiegel bis auf 2 500 Meter leben sie in nahezu jeder Art von Gewässern, von Pfützen bis zu Bergbächen und Mooren. Ursprünglich waren lediglich zwei Arten bekannt, die jedoch aufgrund der immensen Variabilität in Färbung, Zeichnungsmuster und Morphologie nicht sicher voneinander zu unterscheiden waren. Genetische Analysen lieferten dann den überraschenden Befund, dass es sich um einen Komplex zahlreicher kryptischer Arten handelt. Mittlerweile werden ungefähr 25 genetische Linien unterschieden, die mittlerweile als unbeschriebene Arten betrachtet werden.<sup>123</sup> In jedem Gebiet, das auf Borneo bislang entsprechend untersucht wurde, leben sympatrisch bis zu drei dieser Arten. Vorliegende Daten weisen darauf hin, dass jede dieser Arten streng an einen ganz bestimmten Lebensraum gebunden ist, der zum Beispiel eine bestimmte Temperatur, Strömungsgeschwindigkeit oder Bodenstruktur aufweist. Da diese Mikrohabitate mosaikartig verteilt sind, entstehen komplexe Verbreitungsmuster; meist kommen die Arten jedoch nicht syntop vor. Viele Fragen zu Habitatwahl, Ökologie oder Lebensweise der Frösche und ihrer Larven sind allerdings nach wie vor nicht geklärt, oft sind nicht einmal die Kaulquappen bekannt. Möglicherweise unterscheidet sich die ökologische Nische der Larven nah verwandter Arten stärker als die der Frösche, so dass die Kaulquappen auch eher an äusseren Merkmalen bestimmt werden könn-

---

123 Masafumi Matsui, Norihiro Kuraishi, Koshiro Eto et al. «Unusually high genetic diversity in the Bornean *Limnonectes kuhlii*-like fanged frogs (Anura: Dicroglossidae)», in: *Molecular Phylogenetics and Evolution* 102 (2016), S. 305–319; David S. McLeod, «Of Least Concern? Systematics of a cryptic species complex: *Limnonectes kuhlii* (Amphibia: Anura: Dicroglossidae)», in: *Molecular Phylogenetics and Evolution* 56 (2010), S. 991–1000.

ten. Neben der Untersuchung dieser zahlreichen offenen Fragen sind Analysen genetischer Daten aus den Genomen der verschiedenen Arten notwendig, um den Austausch von Genen oder die reproduktive Isolation nachweisen zu können. Vergleichbare Zahlen kryptischer Arten wurden in mehreren anderen Froschgruppen von Sundaland und angrenzenden Gebieten nachgewiesen, unter vielen anderen seien hier nur die Pfützenfrösche (*Occidozyga*), die Bachkröten (*Ansonia*),<sup>124</sup> der Wächterfrosch (*Limnonectes palavanensis*) oder der Zimtfrosch (*Nyctixalus pictus*) genannt. An allen erwähnten Gruppen wird derzeit intensiv geforscht. Grundsätzlich ist das Phänomen kryptischer Arten mittlerweile von praktisch allen Tiergruppen und Regionen der Erde bekannt.<sup>125</sup> In der europäischen Fauna wurde in den vergangenen Jahren auch eine Reihe von Amphibienarten beschrieben, die sich äusserlich kaum unterscheiden lassen. Allerdings ist die Grössenordnung eine andere: in den Tropen ist die Zahl der kryptischen Artkomplexe bei Amphibien ebenso wie die Zahl der jeweils enthaltenen Arten wesentlich grösser. Zudem sind diese Arten meist schon länger voneinander getrennt, was sich anhand der stärker ausgeprägten genetischen Unterschiede belegen lässt. Zudem sind kryptische Arten in Europa meist allopatrisch verbreitet und haben allenfalls schmale Kontaktzonen ihrer Areale, während bei tropischen Artkomplexen auch sympatrische oder sogar syntope Verbreitung häufiger vorkommt. Im Vergleich zu den über längere Zeiträume relativ stabil gebliebenen Lebensbedingungen in äquatornahen Gebieten, wurde die Evolution in Europa durch die Zäsuren der Eiszeiten geprägt. In vielen Tiergruppen sind daher vermutlich evolutionäre Linien in den Kaltzeiten in nördlichen Breiten ausgestorben oder konnten nur in Refugien überleben.

---

124 Lea E. Waser, Manuel Schweizer, Stefan T. Hertwig et al., «From a lost world: an integrative phylogenetic analysis of *Ansonia* Stoliczka, 1870 (Lissamphibia: Anura: Bufonidae), with the description of a new species», in: *Organisms Diversity & Evolution* 17 (2017), S. 287–303.

125 Peter Trontelj und Cene Fišer, «Perspectives: Cryptic species diversity should not be trivialized», in: *Systematics and Biodiversity* 7:1 (2008), S. 1–3.



Abbildung 3: Männchen einer der zahlreichen unbeschriebenen Arten aus der *Limnonectes kuhllii*-Verwandtschaft von Borneo.

Arten, die sich äusserlich nicht oder zumindest nur geringfügig unterscheiden, fordern das Verständnis von Evolution grundsätzlich heraus. Üblicherweise sind Arten jeweils an unterschiedliche Lebensbedingungen angepasst und besetzen damit unterschiedliche ökologische Nischen. Dementsprechend sollten sie sich in ihren äusseren Merkmalen auch entsprechend auseinanderentwickelt haben und sich an diesen Merkmalen unterscheiden lassen. Eine sukzessive Aufspaltung durch unterschiedliche natürliche Auslese von einer Stammart in mehrere Tochterarten, die sich ökologisch und morphologisch deutlich unterscheiden, wird als adaptive Radiation bezeichnet.<sup>126</sup> Für die philippinischen Engmaulfrösche der Gattung *Kaloula* konnte gezeigt werden, dass ihre Vielfalt im Rahmen einer adaptiven Radiation entstanden ist.<sup>127</sup> Diese Frösche spalteten sich früh in verschiedene Linien mit abweichender ökologischer Spezialisierung auf, deren Unterschiede im Körperbau durch die entsprechenden Anpassungen erklärt werden können. Manche spezialisierten sich auf das Leben am Boden, andere auf das Klettern in Büschen, wieder andere auf das Leben auf Bäumen und die Fortpflanzung in Baumhöhlen.<sup>128</sup>

Bei der überwiegenden Zahl der kryptischen Arten scheint allerdings ein anderer Mechanismus der Artbildung stattgefunden zu haben, da sie sich (zumindest nach heutigem Wissensstand) nicht oder nur geringfügig in äusseren Merkmalen unterscheiden. Teilweise sind selbst mit sehr genauen, auf Industriestandards beruhenden Messmethoden und ausgefeilten statistischen

---

126 David C. Blackburn, Cameron D. Siler, Arvin C. Diesmos et al. «An adaptive radiation of frogs in a southeast asian island archipelago», in: *Evolution* 67:9 (2013), S. 2631–2646.

127 Ebd.

128 Ebd.

Auswertungen der Daten kaum Unterschiede im Körperbau auszumachen.<sup>129</sup> Solche kryptischen Arten besetzen wohl ähnliche ökologische Nischen und sind eher durch räumliche Auftrennung von Populationen einer Stammart durch geografische Barrieren entstanden. Später verloren diese Arten die Fähigkeit, sich untereinander fortzupflanzen, sie breiteten sich aus und kamen wieder in Kontakt zu ihren nächsten Verwandten. Ein wichtiger artspezifischer Erkennungsmechanismus bei Fröschen sind die Rufe, an denen die Weibchen die arteigenen Männchen erkennen. Kryptische Arten werden sich in vielen Fällen bioakustisch unterscheiden lassen,<sup>130</sup> allerdings fehlen bislang bei den meisten Froschgruppen die dafür notwendigen Untersuchungen und Daten auf breiter Basis. Wenn durch solche Fortpflanzungsbarrieren die Vermischung der Arten verhindert wird, können mehrere von ihnen sympatrisch vorkommen und sich dann unter dem Druck der untereinander bestehenden Konkurrenz um Ressourcen an abweichende ökologische Nischen anpassen. Diese ökologischen Unterschiede können theoretisch bei den Larven, den Fröschen oder bei beiden Stadien auftreten.

### Biogeografie

Die systematische Erforschung der Biogeografie der Region Sundaland geht auf den englischen Naturforscher Alfred R. Wallace zurück, der 1872 mit einer umfangreichen Untersuchung der geographischen Verteilung der Arten zu arbeiten begann. Wallace war in seinem Entdeckergeist auch von Humboldts Wirken und Publikationen beeinflusst worden.<sup>131</sup> Mit seinem 1880 erschienenen Werk *Island Life* begründete er die Inselbiogeografie. Die von Wallace darin vorgeschlagene Unterscheidung von ozeanischen Inseln, die inmitten des Ozeans entstanden sind, und nie Teil eines grossen Kontinents waren, und kontinentalen Inseln, die auf einem Kontinentalschelf liegen und zumindest zeitweise Teil eines Kontinents waren, hat auch heute Bestand. Zudem diskutierte er bereits die Auswirkungen von Klimaveränderungen auf

---

129 Waser et al. 2017.

130 Jörn Köhler, Martin Jansen, Miguel Vences et al., «The use of bioacoustics in anuran taxonomy: theory, terminology, methods and recommendations for best practice», in: *Zootaxa* 4251 (2017), S. 1–124.

131 Alfred Russel Wallace, *Abenteuer am Amazonas und am Rio Negro*, herausgegeben von Matthias Glaubrecht, Berlin: Galiani 2014.

die Ausbreitung von Tier- und Pflanzenarten. Nach Wallace wurde später die Faunengrenze zwischen der asiatischen und der australischen Region als *Wallace Linie* benannt, die er anhand der Verbreitungsmuster verschiedener Tierarten erkannt hatte.

Allerdings wurde die Theorie der Kontinentaldrift und der Plattentektonik, die als Grundlage für das Verständnis der geologischen Vergangenheit Südostasiens unabdingbar ist, erst am Beginn des 20. Jahrhunderts formuliert.<sup>132</sup> Aufgrund der komplizierten geologischen Entstehung Sundalands ist die Evolution der dortigen Artenvielfalt nur im Zusammenhang mit den angrenzenden Regionen, den Philippinen im Norden, der Wallacea im Osten sowie dem südostasiatischen Festland zu verstehen. Heute bestehen recht genaue Vorstellungen über die komplizierte erdgeschichtliche Entwicklung dieser Region. Die zahlreichen Arbeiten von Robert Hall bilden eine robuste Basis für Rekonstruktionen der Evolution und der Ausbreitungsgeschichte der Tier- und Pflanzenarten in dieser Region.<sup>133</sup> Das Aufeinandertreffen der Eurasischen, Australischen, Philippinischen und Pazifischen Kontinentalplatten an den Grenzen Sundalands führte zu komplizierten Subduktionsbewegungen, Gebirgshebungen und Vulkanismus. Die Insel Palawan im Norden Borneos gehört politisch zu den Philippinen, wird aber biogeographisch als Teil von Sundaland betrachtet. Geologisch ist Palawan jedoch eine mikrokontinentale Platte, die von der Küste Südchinas stammt und nach Süden gedriftet ist. Der eigentliche philippinische Archipel im Nordosten Sundalands besteht dagegen aus ozeanischen Inseln meist vulkanischen Ursprungs, die nie eine Verbindung zu einem Kontinent hatten. An der östlichen Grenze von Sundaland verläuft entlang eines Tiefwasserkanals die Wallace Linie und trennt die sich anschliessende Faunenregion Wallacea ab, mit der nie Verbindungen über Landbrücken bestanden. Die Wallacea ihrerseits ist eine geologisch relativ junge Übergangsregion zwischen dem Sunda Shelf im Westen und dem sich im Osten anschliessenden Sahul Shelf, der den nördlichen Teil der australischen Kontinentalplatte bildet. Sie umfasst die Insel Sulawesi und

---

132 Alfred Wegener, *Die Entstehung der Kontinente und Ozeane*, Braunschweig: Vieweg 1915.

133 Robert Hall, «Sundaland and Wallacea: geology, plate tectonics and palaeogeography», in D. J. Gower et al. (Hrsg.), *Biotic Evolution and Environmental Change in Southeast Asia*, Cambridge: Cambridge University Press 2012, S. 32–78. Robert Hall, «The palaeogeography of Sundaland and Wallacea since the Late Jurassic», in: *Journal of Limnology* 72, 2013, S. 1–17.

die zahlreichen, sogenannten Kleinen Sundainseln. Alle Froschgruppen, die heute auf Sundaland verbreitet sind, haben einen asiatischen Ursprung. Etliche haben jedoch den Sprung nach Osten über die Wallace Linie geschafft und sind in der Wallacea, vor allem auf Sulawesi und anderen grösseren Inseln der Region, heimisch geworden.<sup>134</sup> Die Verwandten der auf Borneo vorkommenden Zwergfrösche der Gattung *Alcalus* der Froschgruppe *Ceratobatrachidae* haben sich bis auf die Salomonen und Fidschi-Inseln ausgebreitet.<sup>135</sup>

Neben den klassischen Methoden der Biogeografie, die auf dem Vergleich der Verbreitung von verschiedenen Organismen und erdgeschichtlichen Ereignissen beruhen, besteht seit einiger Zeit die Möglichkeit, anhand genetischer Daten das Alter von Arten und Verwandtschaftsgruppen abzuschätzen.<sup>136</sup> Die sogenannte molekulare Uhr ist eine Methode der Genetik, um den Zeitpunkt der Aufspaltung zweier Arten von einem gemeinsamen Vorfahren anhand von DNA-Sequenzen zu bestimmen. Vereinfacht gesagt sind die Unterschiede in der DNA umso grösser, je länger zwei Arten voneinander getrennt sind. Allerdings müssen molekulare Uhren kalibriert werden. Entweder werden bestimmte Raten der Veränderung der Gensequenzen über die Zeit angenommen, oder Fossilien, deren Alter und Verwandtschaft bekannt sind, dienen als Kalibrierungspunkte. Zudem werden bei modernen Algorithmen keine exakten Datierungen angegeben, sondern Zeitspannen, innerhalb deren ein Trennungseignis wahrscheinlich stattgefunden hat. Plausibel werden diese Datierungen, wenn sie mit dem Wissen der Paläogeografie und den Ergebnissen der Untersuchung anderer Organismen übereinstimmen und sich darauf aufbauend stimmige evolutive Szenarien ergeben. Die Kombination aus den Ergebnissen dieser modernen molekulargenetischen Analysen mit den paläogeografischen Daten ermöglicht heute ein viel besseres Verständnis für den zeitlichen und räumlichen Ablauf der Evolution als jemals zuvor.

---

134 Ben J. Evans, Rafe M. Brown, Jimmy A. McGuire et al., «Phylogenetics of fanged frogs: testing biogeographical hypotheses at the interface of the Asian and Australian fauna zones», in: *Systematic Biology* 52 (2004), S. 794–819.

135 Rafe M. Brown, Cameron D. Siler, Stephen J. Richards et al., «Multilocus phylogeny and a new classification for Southeast Asian and Melanesian forest frogs (family Ceratobatrachidae)», in: *Zoological Journal of the Linnean Society* 174 (2015), S. 130–168.

136 Volker Knoop und Kai Müller, *Gene und Stammbäume. Ein Handbuch zur molekularen Phylogenetik*, Berlin: Springer 2009.

Überraschenderweise ergaben die bisher verfügbaren Studien an den Fröschens Südostasiens unter Verwendung molekularer Uhren ein sehr hohes Alter von Arten beziehungsweise Gattungen und weisen so auf eine vergleichsweise langsame Evolutionsgeschwindigkeit hin. Eine Untersuchung der Bachkröten (*Ansonia*) kam zu dem Ergebnis, dass nah verwandte, aber eindeutig abgrenzbare Arten mindestens 2,5 Millionen Jahre lang voneinander getrennt existieren.<sup>137</sup> Auch Analysen der Pfützenfrösche (*Occidozyga*) belegen ein relativ hohes Alter der Arten und Verwandtschaftsgruppen innerhalb dieser Gattung.<sup>138</sup> Die Eiszeiten des Pleistozäns und die durch sie ausgelösten schnellen Schwankungen des Meeresspiegels haben demnach für die Entstehung der zahlreichen Froscharten in Südostasien kaum eine Rolle gespielt, sondern in erster Linie die heutige Verbreitung der zu diesem Zeitpunkt bereits vorhandenen Arten beeinflusst. Fraglich ist allerdings, ob bestimmte Annahmen bei den molekularen Uhren oder die verwendeten Kalibrierungspunkte in den Analysen tatsächlich richtig sind und somit die berechneten Zeiträume für die Evolution dieser Gruppen einigermassen der Realität entsprechen. Die starken Abweichungen der Resultate verschiedener bislang publizierter Arbeiten lassen durchaus gewisse Zweifel an den zugrunde gelegten Annahmen aufkommen: Zwei Studien datierten zum Beispiel den Ursprung der philippinischen Arten der Bachkröten (*Ansonia*) auf 2,2 beziehungsweise 20 Millionen Jahre.<sup>139</sup>

In der Biogeografie wird seit langem diskutiert, welcher Mechanismus die heutige Verbreitung der Organismen besser erklärt. Als Vikarianz wird die räumliche Auftrennung einer Art in mindestens zwei getrennte Populationen, aus denen dann zwei neue Arten entstehen, durch die Entstehung einer geographischen Barriere betrachtet. Im Gegensatz dazu besteht der als Dispersal (Ausbreitung) bezeichnete Prozess in der Überwindung einer geografischen Barriere mit anschließender Etablierung in einem bis dahin nicht besiedelten Gebiet, in dem dann auch eine neue Art entsteht. Wie so oft in der Biologie zei-

---

137 L. Lee Grismer et al., «Out of Borneo, again and again: biogeography of the Stream Toad genus *Ansonia* Stoliczka (Anura: Bufonidae) and the discovery of the first limestone cave-dwelling species», in: *Biological Journal of the Linnean Society* 120:2 (2016), S. 371–395.

138 Ergebnisse der Masterarbeit von Jana Flury (im Druck).

139 Sanguila, M.B., Siler, C.D., Diesmos, A.C. et al., «Phylogeography, geographic structure, genetic variation, and potential species boundaries in Philippine slender toads», *Mol. Phylogenet. Evol.* 61 (2011a), 333–350.



gen die verfügbaren Daten an den Fröschen Südostasiens, dass es sich nicht um eine Entweder-Oder-Antwort handelt, sondern dass beide Prozesse zur Entstehung der Artenvielfalt und ihrer heutigen Verbreitungsmuster geführt haben müssen. Für mehrere Verwandtschaftsgruppen konnte das Gebiet der heutigen Insel Borneo und der damit bis vor erdgeschichtlich kurzer Zeit verbundene Teil des Festlandes als Entstehungszentrum identifiziert werden.<sup>140</sup> Von dort breiteten sich später die Vorfahren der heutigen Arten in unabhängigen Ausbreitungsereignissen auf die Insel Palawan, die anderen Inseln des Philippinischen Archipels beziehungsweise nach Sumatra und Java oder nach Sulawesi und auf die Kleinen Sundainseln aus. Neben den erwähnten Zwergfröschen (*Alcalus*) überwandern also auch andere Froschgruppen, zum Beispiel die Gattungen *Limnectes*,<sup>141</sup> *Occidozyga*<sup>142</sup> und *Rhacophorus*, die Wallace Linie, die Sundaland von der westlich anschließenden Wallacea trennt. Auf den neu besiedelten Inseln bildeten sie dann eigene Arten heraus. Sumatra und Java sind zwar Teil des Sunda Shelves, entstanden als Inseln jedoch deutlich später als die Landmassen des nördlichen Sundalands durch Hebungen der Erdkruste entlang der tektonischen Plattengrenzen und den daraus entstandenen Vulkanismus des Pazifischen Feuerrings. Frösche konnten diese neu entstandenen Landmassen möglicherweise über zeitweilig bestehende Landbrücken von den nördlichen Teilen Sundalands aus erreichen. Zu den Philippinen beziehungsweise den zur Wallacea gehörenden Inseln und Sundaland bestand jedoch nie eine Landverbindung. Auch Frösche, obwohl extrem salzempfindlich, müssen also zumindest schmale Meeresarme überwunden haben. Dispersal fand also sowohl über Landbrücken als auch über das Meer statt.<sup>143</sup> Gerade in den Tropen bestehen dafür gute Voraussetzungen, da die dort häufigen Gewitter mit den üblichen heftigen Niederschlägen ganze Flösse entwurzelter Regenwald-bäume entstehen lassen, auf denen auch Frösche zu erfolgreichen Seefahrern werden können. Andere Froscharten waren vermutlich ursprünglich in den Tieflandregenwäldern insbesondere des nördlichen Sundalands weit verbreitet

---

140 Grismer, Wood et al. 2016; Ergebnisse der Masterarbeit von Jana Flury; Evans et al. 2004.

141 Ebd.

142 Djoko T. Iskandar, Umilaela Arifin und Angga Rachmansah, «A new frog (Anura, Dicroglossidae), related to *Occidozyga semipalmata* Smith, 1927, from the eastern peninsula of Sulawesi, Indonesia», in: *Raffles Bulletin of Zoology* 59 (2011), S. 219–228.

143 Flury; Evans, Brown et al. 2004.

und wurden dann in verschiedene geografische Populationen aufgetrennt, als die heutigen Sundainseln durch den steigenden Meeresspiegel separiert wurden. Derartige Vikarianz konnte zum Beispiel bei der Bachkröte *Ansonia leptopus* gezeigt werden, deren separate Populationen genetische Unterschiede aufweisen, die jedoch noch deutlich unter dem Niveau liegen, welches normalerweise zwischen Arten beobachtet wird.<sup>144</sup> In anderen Fällen, etwa bei den Flugfröschen *Rhacophorus borneensis* und *R. reinwardtii*, werden die in verschiedenen Teilen Sundalands voneinander isolierten Populationen aufgrund des Ausmasses der nachgewiesenen genetischen und morphologischen Unterschiede bereits als eigene Arten betrachtet.<sup>145</sup>

### Evolution

Die Untersuchung der Stammesgeschichte der Organismen (Phylogenie), also ihrer Verwandtschaftsbeziehungen und Abstammung, sowie die daraus abgeleitete Ordnung der Organismen (Systematik) haben in den vergangenen Jahrzehnten bedeutende Entwicklungen erlebt. So bieten die internationalen wissenschaftlichen Sammlungen mit ihrem immer umfangreicher werdenden Material aus allen Erdregionen eine deutlich verbesserte Datengrundlage. Methodisch hat sich die phylogenetische Systematik durchgesetzt, die plausible Hypothesen über die gemeinsame Abstammung von Organismen als Ordnungsprinzip nutzt. Dabei werden ausschliesslich Merkmale verwendet, die in der Evolution neu aufgetreten und übereinstimmend bei den fraglichen Organismen vorhanden sind (Synapomorphien). Die erhaltenen Hypothesen über die tatsächliche Verwandtschaft dienen dann als Grundlage für die systematische Ordnung der Organismen und nicht mehr deren möglicherweise nur oberflächliche Ähnlichkeit zueinander. Abgesehen von diesen Prinzipien der modernen phylogenetischen Systematik wurden zudem neue, noch vor wenigen Jahrzehnten nicht denkbare Methoden verfügbar und sind heute breit etabliert: Molekulargenetische Daten (Gensequenzen) und komplexe Algorithmen zur Analyse dieser Daten sind als Werkzeuge des Systematikers nicht mehr wegzudenken.

---

144 Waser et al. 2017.

145 Masafumi Matsui, Tomohiko Shimada und Ahmad Sudin, «A new gliding frog of the genus *Rhacophorus* from Borneo», in: *Current Herpetology* 32 (2013), S. 112–124.

Die Untersuchung von Verwandtschaftsbeziehungen ist kein Selbstzweck: sie bilden den historischen Bezug zum Ablauf evolutionärer Entwicklungen. Auf der Grundlage von plausiblen Hypothesen über die Abstammung einer Tiergruppe lassen sich Szenarien der Entstehung und Veränderung komplexer Merkmale oder Verhaltensweisen entwickeln. Erst daraus ergibt sich ein tieferes Verständnis der Evolution. Das Beispiel der Ruderfrösche (*Rhacophoridae*) und der Evolution ihrer vielfältigen Fortpflanzungsstrategien veranschaulicht diese Zusammenhänge und die sich daraus ergebenden Möglichkeiten. Die rund 350 bekannten Arten der Ruderfrösche leben überwiegend in Asien, nur wenige in Afrika. Die bekanntesten Vertreter dieser Gruppe sind sicher die Flugfrösche, darunter der von Wallace entdeckte und zumindest in seinen Trivialnamen nach ihm benannte Wallace Flugfrosch (*Rhacophorus nigropalmatus*). Diese meist grossen und baumbewohnenden Frösche sind hervorragende Gleitflieger, die ihre grossen Hände und Füsse mit ihren Schwimmhäuten sehr effizient als Tragflächen und Steuer während des Fluges nutzen. Zahlreiche Arten der Ruderfrösche einschliesslich der Flugfrösche bauen Schaumnester, um ihre Eier vor Feinden und Austrocknung zu schützen. Der Schaum wird von beiden Geschlechtern durch gleichzeitige Bewegungen der Hinterbeine erzeugt, wenn sich das Männchen auf dem Weibchen im sogenannten Amplexus festklammert. Diese Schaumnester werden meist oberhalb von kleinen Gewässern auf überhängender Vegetation angelegt (siehe Abbildung 4), so dass die später geschlüpften Larven direkt ins darunter liegende Gewässer fallen und sich dort bis zur Metamorphose entwickeln. Die Ablage der Eier in Schaumnestern über den Gewässern hat zudem den Vorteil, dass die Frösche nachdem sie ihre Umwandlung von der Larve zum Frosch abgeschlossen haben und an Land gegangen sind, nie wieder einen Fuss auf den Boden des Waldes setzen müssen.<sup>146</sup> Denn dort lauern die meisten Fressfeinde, und besonders flink sind die mit langen Beinen und Greifhänden ans Baumleben angepassten Ruderfrösche am Boden auch nicht. Untersuchungen der Stammesgeschichte der Ruderfrösche konnten zeigen, dass das komplexe Verhalten des Schaumnestbaus nur einmal innerhalb dieser Gruppe entstanden

---

146 Robert F. Inger, Robert B. Stuebing, T. Ulmar Grafe et al., *A Field Guide to the Frogs of Borneo*, 3. Auflage, Kota Kinabalu: Natural History Publications Borneo 2017.

ist.<sup>147</sup> Alle Arten mit Schaumnestern bilden eine sogenannte monophyletische Gruppe, deren Angehörige alle von einem nur ihnen gemeinsamen Vorfahren abstammen. Allerdings gibt es eine Ausnahme: die Arten der Gattung *Feihyla* (siehe Abbildung 5) gehören in die Verwandtschaftsgruppe der Schaumnestbauer, bauen selbst aber keine Nester. *Feihyla* kleben ihre Eier ohne Schaumnest an die Unterseite überhängender Blätter und schützen sie lediglich durch eine transparente gallertartige Schicht. Sie haben offensichtlich den Schaumnestbau sekundär verloren – eines der zahllosen Beispiele dafür, dass die Evolution alles andere als geradlinig und teleologisch abläuft.

Die für die Ablage der Eier in den Schaumnestern genutzten Gewässer, die als Lebensraum der Kaulquappen dienen, sind von Art zu Art unterschiedlich. Die meisten Arten der Ruderfrösche haben Larven, die an stehende und zum Teil sehr kleine Gewässer angepasst sind. So konnten Kaulquappen von *Rhacophorus rufipes* in dem wassergefüllten Loch eines umgestürzten Baumes gesammelt werden. Die nah verwandte Art *R. harrisoni* nutzt kleine wassergefüllte Baumhöhlen, der Wallace Flugfrosch die schlammigen Suhlen von Bartschweinen als Lebensraum für seine Larven. Die Larven von *R. pennanorum*, einer extrem seltenen Art, die bislang lediglich an einem Bach in 1700 Metern Höhe im Gunung Mulu Nationalpark in Sarawak auf Borneo gefunden wurde, leben dagegen in klaren Bergbächen mit starker Strömung. Die Kaulquappen dieser Art besitzen in Anpassung an diesen Lebensraum breite Saugmäuler und einen flachen, strömungsoptimierten Körper.<sup>148</sup> Alle Arten der Gattung *Rhacophorus* mit derartigen, sogenannten rheophilen Larven bilden eine geschlossene Abstammungsgemeinschaft. Die Anpassung der Kaulquappen an schnell fließende Gewässer ist daher innerhalb der Ruderfrösche nur einmal entstanden.

Neben dem Schaumnestbau und den verschiedenen Anpassungen ihrer Larven zeigen die Ruderfrösche weitere abgeleitete Fortpflanzungsstrategien. Bei der sogenannten Direktentwicklung schlüpft ein fertig entwickeltes Fröschchen direkt aus dem Ei, das seine Entwicklung ohne ein freies Larven-

---

147 Stefan T. Hertwig, Manuel Schweizer, Indraneil Das et al., «Diversification in a biodiversity hotspot – the evolution of Southeast Asian rhacophorid tree frogs on Borneo (Amphibia: Anura: Rhacophoridae)», in: *Molecular Phylogenetics and Evolution* 68 (2013), S. 567–581.

148 Haas, A., Hertwig, S.T., Krings, W. et al., (2012): «Description of three *Rhacophorus* tadpoles (Lissamphibia: Anura: Rhacophoridae) from Sarawak, Malaysia (Borneo)», *Zootaxa* 3328, S. 1–9; Hertwig et al. 2013.



Abbildung 4: Suhle von Bartschweinen (*Sus barbatus*) im Tieflandregenwald des Danum Valley Conservation Area, Sabah, Malaysia. Die kleinen Pfützen dienen als Lebensraum der Larven von Wallace-Flugfröschen (*Rhacophorus nigropalmatus*). Auf der rechten Seite des Bildes ist ein Schaumnest dieser Art zu sehen.



Abbildung 5: Die einzige auf Borneo vorkommende Art ihrer Gattung, die sekundär die Fähigkeit zum Bau von Schaumnestern verloren hat: *Feihyla kajau*, Danum Valley Conservation Area, Sabah, Malaysia.

stadium absolviert hat. Direktentwicklung scheint eine evolutionär erfolgreiche Strategie zu sein, da viele Froschgruppen mit dieser Fortpflanzungsstrategie besonders artenreich sind. Diese abgeleitete Form der Entwicklung ist eine besondere Anpassung an Lebensräume ohne permanente Gewässer, wie zum Beispiel Montanwälder an steilen Bergflanken, wo es zwar fast täglich ausgiebige Niederschläge gibt, das Wasser jedoch auch schnell abfließt. Dort haben Arten mit Direktentwicklung einen evolutionären Vorteil, da sie lediglich feuchtes Substrat, wie Moos oder verrottendes Laub, für ihre Eier brauchen und ansonsten unabhängig von Gewässern sind. Ein weiterer Vorteil der Direktentwicklung ist sicher auch die Vermeidung von Konkurrenz mit den Larven anderer Amphibien sowie von Fressfeinden, beispielsweise der allgegenwärtigen Libellenlarven.

Anhand der Rekonstruktion der Stammesgeschichte der Ruderfrösche konnte gezeigt werden, dass Direktentwicklung innerhalb dieser Gruppe zweimal unabhängig voneinander entstanden ist. Konvergent entstanden artenreiche Gruppen, die kein freies Larvenstadium mehr besitzen: Einmal im Süden Indiens und auf Sri Lanka bei den Gattungen *Pseudophilautus* und *Raorchestes* sowie ein zweites Mal in Südostasien innerhalb der Gattung *Philautus*<sup>149</sup> (siehe Abbildung 6). Die ursprünglichen *Philautus*-Arten haben noch freilebende Kaulquappen, die aus dem Ei schlüpfen und sich jedoch bis zur Metamorphose wohl ausschliesslich vom Dottervorrat in ihrem Darm ernähren (Lecitotrophie). Darauf deuten auch das Fehlen von Hornzähnen und Hornkiefern an ihrem Mund hin. Mit diesen Strukturen des Mundfeldes raspeln Kaulquappen ansonsten ihre Nahrung ab und zerkleinern sie. Diese weitgehend inaktiven, lecitotrophen Larven wurden bislang bei *Philautus macroscelis* und *Philautus hosei* nachgewiesen.<sup>150</sup> Beobachtungen an einer neuentdeckten, weiteren ursprünglichen Art dieser Gattung, deren Beschreibung gerade vorbereitet wird,<sup>151</sup> ermöglichten spektakuläre neue Einblicke in diesen Fortpflanzungsmodus. Diese Frösche, die bisher nur an einem Fundort

---

149 Hertwig et al. 2013.

150 Stefan T. Hertwig et al., «Phylogenetic relationships of the *Rhacophorus everetti*-group and implications for the evolution of reproductive modes in *Philautus* (Amphibia: Anura: Rhacophoridae)», in: *Zoologica Scripta* 41:1 (2012), S. 29–46; Robert F. Inger, *The Amphibia of Borneo*, Chicago: Field Museum of Natural History 1966.

151 Masterarbeit von Laurence Etter (im Druck).

in 2 100 Meter Höhe gefunden wurden, sind besonders eng an eine grosse Art der Kannenpflanzen, *Nepenthes mollis*, gebunden. Die Männchen rufen von den Kannenpflanzen, dann werden die Eier in die wassergefüllten Fangblätter dieser fleischfressenden Pflanzen abgelegt. Die Larven leben in diesem exklusiven Lebensraum, der ursprünglich dem Fang und der Verdauung von Insekten diente. Sie haben einen mit Dotter gefüllten Darm, und an ihrem Mundfeld fehlen jegliche Strukturen zur Nahrungsaufnahme.



Abbildung 6: Diese Männchen von *Philautus auranitium* wurde rufend in dem gerollten Blatt gefunden. Payeh Maga Nationalpark, Sarawak, Malaysia.

Aus diesem Fortpflanzungsmodus war es vermutlich ein kleiner Schritt, ganz auf den Schlupf der Kaulquappe zu verzichten und die Entwicklung bis zum Frosch im Ei zu beenden. Tatsächlich fehlen bei vielen *Philautus*-Arten Borneos noch bestätigte Beobachtungen ihres Fortpflanzungsverhaltens. Bei der nur von der Gipfelregion des Gunung Mulu bekannten Art *P. acutus* konnte die Fortpflanzung durch Direktentwicklung allerdings zweifelsfrei nachgewiesen werden. Auf einer Expedition im Gunung Mulu Nationalpark fand einer der einheimische Führer, ein junger Mann aus der indigenen Volksgruppe der Penan, zwei Eier mit fast fertig entwickelten Fröschen darin. Diese konnten später im Labor anhand ihres genetischen Barcodes den dort lebenden Fröschen dieser Art zugeordnet werden.<sup>152</sup> Diese einfache Studie ist ein Beleg dafür, wie Funde aus der Feldarbeit die Basis für spätere Labor-

<sup>152</sup> Stefan T. Hertwig, Karin E. Lilje, Pui Yong Min et al., «Evidence of direct development in the rhacophorid frog *Philautus acutus* (Rhacophoridae, Anura) from Borneo», in: *Raffles Bulletin of Zoology* 60 (2012), S. 559–568.

untersuchungen und deren Auswertung bilden. Alle *Philautus*-Arten, bei denen bislang Direktentwicklung nachgewiesen wurde, sind dagegen sehr nah miteinander verwandt. Daher ist anzunehmen, dass Direktentwicklung nur einmal innerhalb der Gattung *Philautus* beim letzten gemeinsamen Vorfahren dieser Arten entstanden ist.

### Sammlungen

Der Grundgedanke des Humboldtschen Bildungsideals, das auf Alexanders Bruder Wilhelm von Humboldt zurückgeht, besteht in einer ganzheitlichen universitären Ausbildung in den Künsten und Wissenschaften und in der Einheit von Forschung und Lehre. In diesem Sinn entstand in Bern schon vor geraumer Zeit eine langjährige enge Zusammenarbeit zwischen der Universität und dem Naturhistorischen Museum. Beide Einrichtungen sind vertraglich eng aneinandergelunden, institutionell jedoch unabhängig, da das Museum seit dem Ausscheidungsvertrag von 1852 von der Burgergemeinde Bern betrieben wird. Neben der breit aufgestellten universitären Ausbildung können Studierende im Rahmen von Praktika oder Abschlussarbeiten einen Einblick in ein modernes Forschungsmuseum mit einer umfangreichen wissenschaftlichen Sammlung erhalten. Darüber hinaus können sie selbst aktiv an Forschungsprojekten im Museum mitarbeiten, welche die wissenschaftliche Nutzung der Sammlung und deren Erweiterung durch Forschungsreisen und Feldarbeit beinhalten. So wird einerseits den Studierenden eine hohe Diversität in der Lehre angeboten, andererseits ist das Museum eingebunden in die universitäre Lehre und Forschung: ein Gewinn für beide Partner.

Für Alexander von Humboldt waren Sammeln und Erforschung naturbeziehungsweise kulturwissenschaftlicher Objekte zwei Seiten einer Medaille. Obwohl er es ablehnte, eine Privatsammlung aufzubauen, trug er von allen Reisen umfangreiches Sammlungsmaterial zusammen und unterstützte auch den Ankauf von Sammlungen, sorgte jedoch dafür, dass alles an öffentliche Museen übergeben wurde. Diese musealen Sammlungen («museal» hatte damals wohl keinen staubigen Beigeschmack) waren zu dieser Zeit «Orte eines lebendigen, unvorhersehbaren, noch zu generierenden Wissens, Plattformen wissenschaftlicher und künstlerischer Kreativität».<sup>153</sup> Naturwissenschaftli-

---

153 Bénédicte Savoy, «Alexander von Humboldt als Sammler», in: *Tagesspiegel*, 18. Januar 2017.



che Sammlungen sind nichts weniger als umfassende Archive der Erde, deren gespeicherte Geschichten durch wissenschaftliche Nutzung erzählt werden. In ihnen lagern zeitlich unbefristet Belege des Lebens, seiner Erforschung sowie seiner abiotischen Grundlagen. Voraussetzung für eine wissenschaftliche Nutzbarkeit der Sammlungen ist die bestmögliche Dokumentation und Aufbewahrung der Objekte (siehe Abbildung 1). Die Bedeutung und das grosse Potential naturwissenschaftlicher Sammlungen für heutige und künftige Forschung wurden mittlerweile in vielen Ländern erkannt und in Förderprogramme oder zumindest politische Absichtserklärungen umgesetzt.

Die heutige Nutzung von Sammlungen und aller zu den Objekten verfügbaren Informationen verlangt nach ihrer digitalen Erfassung. Dabei darf nicht vergessen werden, dass die Qualität der erfassten Daten von der Überprüfung ihrer Richtigkeit durch Experten abhängt. Anders gesagt, die Digitalisierung falscher Daten bringt wenig. Museen und damit ihren Trägern fällt die gewaltige Aufgabe zu, ihre Sammlungen nicht nur zu erhalten und auszubauen, sondern auch eine den modernen Erfordernissen entsprechende Erfassung und Nutzung zu garantieren. Hierfür sind nicht nur eine geeignete Infrastruktur nötig, sondern vor allem auch qualifiziertes Personal für die konservatorische Betreuung und wissenschaftliche Kuration. An modernen Forschungsmuseen sind Erforschung und gezielte Erweiterung der Sammlungen integrale Bestandteile von deren Kuration.

Sammlungen naturwissenschaftlicher Objekte gelten heute vollkommen zurecht als schützenswerte Kulturgüter. Sie stellen einen wertvollen Schatz dar, der allen ernsthaft Interessierten weltweit zur Verfügung steht – und das ohne Verfallsdatum, da Sammlungen gleichsam für die Ewigkeit erhalten werden. Die in den Objekten enthaltenen Daten können Antworten auf viele Fragen der Evolution des Lebens liefern, sofern sie mit den richtigen Methoden entschlüsselt werden. Moderne Sequenzierungstechniken erlauben die Untersuchung des Erbguts von jahrhundertealten Museumsexemplaren; Isotopenanalysen ermöglichen Rückschlüsse auf die ehemalige Lebensweise und Ernährung der präparierten Tiere.<sup>154</sup> Die Digitalisierung der Sammlungsbestände erlaubt die gezielte Suche nach bestimmten Exemplaren und ihren

---

154 Inês C. R. Barbosa, Maximiliane Kley, Stefan Hertwig et al., «Analysing the isotopic life history of the alpine ungulates *Capra ibex* and *Rupicapra rupicapra* through their horns», in: *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 23 (2009), S. 2347–2356.

Daten sowie deren Erfassung auch in übergeordneten Datenbanken. Sammlungen dokumentieren die historische Verbreitung von Arten, teilweise vor jeglicher menschlichen Einflussnahme. Sammlungen sind unverzichtbar für die Beschreibung und Dokumentation der real existierenden Biodiversität – und liefern daher Argumente für den Arten- und Naturschutz. Ohne Sammlungen gäbe es praktisch keine Bestimmungsbücher. In den Museen dienen Sammlungen der Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses und der Vermittlung von Wissen in den Ausstellungen. Kurzum, Sammlungen sind ein unverzichtbarer Teil der modernen Biowissenschaften, auch wenn diese Erkenntnis zwischenzeitlich etwas in Vergessenheit geraten war.

Heute müssen sich die Museen allerdings auch den Herausforderungen stellen, die durch die frühere Sammeltätigkeit auf anderen Kontinenten und deren heutige Bewertung entstanden sind. Die Sammlungen naturhistorischer Museen haben ihre Wurzeln oft in den Wunderkammern und Kuriositätenkabinetten des Feudalismus im 17. und 18. Jahrhundert. Bald begann auch die Sammeltätigkeit in Regionen ausserhalb Europas, die europäischen Forschern und Sammlern meist erst durch die Kolonialisierung zugänglich wurden.<sup>155</sup> Besonders umfangreiche Sammlungsbestände aus dieser Epoche lagern daher oft in den Naturhistorischen Museen ehemaliger Kolonialmächte, die dadurch in ihrer Entwicklung entscheidend geprägt wurden.<sup>156</sup> Historiker haben auch Verbindungen zwischen Sammlern und dem Sklavenhandel rekonstruiert.<sup>157</sup> Daher wird die Rechtmässigkeit des Besitzes insbesondere von Kulturgütern, aber zunehmend auch von naturwissenschaftlichen Objekten aus dieser Epoche grundsätzlich infrage gestellt und intensiv in der Fachwelt, der Politik und den Feuilletons diskutiert.<sup>158</sup> Die Provenienzforschung wird besonders bei Objekten ethnografischer Sammlungen zunehmend bedeutsam.<sup>159</sup> Obwohl Präparate von Pflanzen und Tieren aus naturwis-

---

155 Sam Kean, «Science's debt to the slave trade. Historians confront the tainted origins of key plant and animal Collections», in: *Science* 364:6435 (2019), S. 16–20.

156 Holger Stoecker, zitiert in: Gretchen Vogel, «Natural history museums face their own past», in: *Science* 363:6434 (2019), S. 1371–1372.

157 Kean 2019.

158 Felwine Sarr und Bénédicte Savoy, *Rapport sur la restitution du patrimoine culturel africain. Vers une nouvelle éthique relationnelle* URL: [http://restitutionreport2018.com/sarr\\_savoy\\_fr.pdf](http://restitutionreport2018.com/sarr_savoy_fr.pdf), 2018, eingesehen Januar 2019.

159 Friedemann Schrenk, «Wir müssen um Afrikas Erbe verhandeln!», in: *Frankfurter Allgemeine Zeitung*, 30.4.2019.

senschaftlichen Sammlungen in dieser Diskussion eine eher untergeordnete Rolle gespielt haben, wird die Diskussion über die Restitutions bestimmter naturkundlicher Objekte lauter.<sup>160</sup> So laufen Anfragen und Verhandlungen zur Rückgabe von Dinosaurierskeletten, Riesenfaultieren und Schädeln von Hominiden aus europäischen Museen an die Herkunftsländer. Ein Exemplar des ausgestorbenen Riesenvogels *Pelagornis chilensis* wurde bereits nach Chile überführt.<sup>161</sup> Im Gegensatz zu Artefakten, die von Menschen in einem kulturellen Kontext geschaffen wurden, ist die Frage nach Eigentumsrechten an natürlichen Objekten wesentlich schwieriger zu beantworten. Hier gibt es keine Schöpfung im Sinne eines kreativen Aktes, somit keine Urheberschaft, und in den meisten Fällen auch keinen eindeutigen kulturellen Kontext, in den die Entstehung von Biodiversität, Fossilien, Gesteinen und Mineralien gestellt werden könnte. Tatsächlich stellen sich auch grundsätzliche Fragen zu den Eigentumsrechten am Naturerbe. Ist die exorbitante Biodiversität Amazoniens im Besitz der dort beheimateten indigenen Völker? Oder liegen die Besitzrechte bei den heutigen südamerikanischen Nationalstaaten? Oder müsste die Vielfalt der Natur in ihrer Gesamtheit nicht eher als gemeinsames Erbe der Menschheit betrachtet werden, dessen Erforschung und Erhaltung eine Herausforderung der gesamten Menschheit sind?

Ein gelegentlich ins Feld geführtes Argument der Befürworter von Restitutions hat jedenfalls keinen Bestand: Museen verdienen kein Geld mit der Ausstellung ihrer Objekte. Per Definition sind Museen Institutionen, deren Wirtschaften explizit nicht auf Gewinn ausgerichtet ist. Wohl die allermeisten, in jedem Fall alle naturhistorischen Museen, sind reine Zuschussgeschäfte, die der dauerhaften Unterstützung durch ihre Träger bedürfen. Der langfristige Betrieb von Museen, inklusive der Aufrechterhaltung ihrer Ausstellungen und insbesondere der Erhaltung und Kuratation ihrer Sammlungen sind eine anspruchsvolle gesellschaftliche Aufgabe. Die langfristig notwendigen Kosten für personelle Ressourcen und Infrastruktur sollten daher in der Diskussion um Rückführungen angemessen berücksichtigt werden.

Der weitaus grösste Teil der naturwissenschaftlichen Sammlungen ist zudem gar nicht interessant für Ausstellungen: Wer will schon Millionen ein-

---

<sup>160</sup> Vogel 2019.

<sup>161</sup> Ebd.

zelter Käfer, Fische oder getrockneter Pflanzen anschauen? Restitutionen erfordern also zunächst umfangreiche Investitionen in den Ausbau oder sogar den Neubau von Museen, um angemessene Ausstellungs- und Sammlungs-räume zu schaffen. Diesbezüglich sind positive Entwicklungen hinsichtlich des Aufbaus von wissenschaftlichen Institutionen und der Ausbildung von Forschern sichtbar, die unbedingt angemessen unterstützt werden sollten.<sup>162</sup>

Nichts spricht gegen die Restitution naturwissenschaftlicher Objekte, an die eine besondere, teilweise auch kulturelle Bedeutung geknüpft sind, wie Hominidenfunde oder andere charismatische Fossilien, sofern die Voraussetzungen für ihre Aufbewahrung und Nutzung erfüllt sind. Anstatt jedoch fragile Sammlungsbestände vollständig in die Herkunftsländer zurückzuführen, sollte das in den Naturwissenschaften bereits seit langer Zeit bestehende Prinzip der internationalen Zusammenarbeit fortgeführt und ausgebaut werden. Angesichts des florierenden internationalen Leihverkehrs und der globalen Möglichkeiten der Kooperation spielt es nur noch eine untergeordnete Rolle, wo das wissenschaftliche Sammlungsmaterial lagert. Entscheidend ist, dass es nach gegenwärtigem Stand des Wissens langfristig erhalten, für alle Interessierten wissenschaftlich nutzbar und bei Bedarf auch für Ausstellungen verfügbar bleibt. Naturwissenschaftliche Sammlungen haben als Arbeitsgrundlage insbesondere der Biodiversitätsforschung eine dringende Aufgabe zu erfüllen. Die naturhistorischen Museen beziehungsweise ihre Träger auf der ganzen Welt müssen daher die langfristige und kostspielige Aufgabe gemeinsam schultern, wissenschaftliche Sammlungen als Kulturgüter im Sinne eines gemeinsamen Erbes der Menschheit zu bewahren.

Bei wertvollem Sammlungsmaterial wie den Typen, die Artbeschreibungen zugrunde liegen, bedeuten Doubletten in verschiedenen Museen ein geteiltes Risiko und ermöglichen gleichzeitig eine bessere Verfügbarkeit in allen Teilen der Welt. In den letzten Jahren haben die Brände in Brasiliens Nationalmuseum beziehungsweise im Forschungsinstitut Butantan gezeigt, dass Sammlungsmaterial nie ganz sicher an einem Ort allein gelagert werden kann. Langfristige internationale Forschungsk Kooperationen einschliesslich der Ausbildung von Studenten sowie gegenseitige Unterstützung beim

---

162 Raphael Schwere, «Afrikas Museen haben sich längst emanzipiert», in: *Neue Zürcher Zeitung*, 17.4.2019.

Aufbau von Kapazitäten und Infrastruktur schaffen Vertrauen. Leider stehen diesem Ideal real existierende politische Probleme im Weg. Nationale Ausfuhrbeschränkungen im Leihverkehr von Objekten und stringente Einreisebestimmungen für WissenschaftlerInnen konterkarieren den Weg internationaler Kooperation und lassen Rufe nach Restitutionen durchaus nachvollziehbar erscheinen.

### **Anthropozän und Biodiversitätskrise**

Humboldt beschrieb in seinen Reiseberichten die von ihm beobachtete Zerstörung natürlicher Lebensräume in Folge der Inbesitznahme durch europäische Kolonialherren und Siedler. Er machte sich auch Gedanken über die langfristigen Konsequenzen, die sich für Vegetation, Wasserhaushalt und Klima ergaben.<sup>163</sup> Die Abholzung von Wäldern war damals noch auf verhältnismässig kleine Gebiete beschränkt. Seit dieser Zeit jedoch haben sich Geschwindigkeit und Ausmass der durch den Menschen verursachten Veränderungen nahezu aller Lebensräume signifikant vergrössert. Südostasien weist heute eine der schnellsten Raten der Entwaldung auf.<sup>164</sup> Besonders problematisch ist die heute auf unvorstellbar grossen Flächen stattfindende Umwandlung ehemaliger Wälder in Anbauflächen insbesondere für Ölpalmen (siehe Abbildung 7). Allerdings sind die weitaus meisten Wälder auf Borneo durch mehrfachen, sogenannten selektiven Holzeinschlag bereits mehr oder weniger degradiert. Im malaysischen Bundesstaat Sarawak gelten lediglich der Bergwald im Usun Apau Nationalpark und der Tieflandregenwald im Gunung Mulu Nationalpark noch als echte Primärwälder, die nie forstwirtschaftlich genutzt wurden. Ansonsten sind sogar in den steilsten Bergflanken die wirtschaftlich wertvollen Bäume mindestens einmal per Helikopter entnommen worden.

---

163 Alexander von Humboldt, *Die Reise nach Südamerika*, 1. Auflage, herausgegeben von Jürgen Starbatty, Göttingen: Lamuv 1990.

164 Mikaela Weisse und Liz Goldman, *The World Lost a Belgium-sized Area of Primary Rainforests Last Year* <https://blog.globalforestwatch.org/data-and-research/world-lost-belgium-sized-area-of-primary-rainforests-last-year/>, 2019, eingesehen Januar 2019. Belinda Arunarwati Margono, Peter V. Potapov, Svetlana Turubanova et al., «Primary forest cover loss in Indonesia over 2000–2012», in: *Nature Climate Change* 4 (2014), S. 730–735.

Abbildung 7: Ein Holztransporter fährt durch eine ausgedehnte Ölpalmenplantage in Sarawak, Malaysia. Die geladenen Stämme sind weit von den Dimensionen ehemaliger Urwaldriesen entfernt.



Die immer schnellere Umgestaltung der Erde durch eine wachsende Zahl von Menschen und der sich daraus ergebende Verlust an Lebensräumen bleibt nicht ohne Folgen für die Biodiversität.<sup>165</sup> Als Robert F. Inger mit seiner Feldarbeit auf Borneo in der Mitte des vorigen Jahrhunderts begann, war praktisch die ganze Insel noch von unberührtem Tieflandregenwald bedeckt. In seinen frühen Arbeiten zur Lebensweise mancher Froscharten findet sich in den Beschreibungen der Fortpflanzungsgewässer oft die lakonische Angabe, dass Nashornsuhlen gern zur Fortpflanzung genutzt werden.<sup>166</sup> Das Borneo Nashorn ist seit 2015 in der Wildnis Malaysias ausgestorben, auf der ganzen Insel existiert nur noch eine Handvoll freilebender Exemplare in einer kleinen Population im indonesischen Teil. Die langfristigen Auswirkungen des Fehlens der Nashörner auf Vegetation und Fauna sind nicht bekannt.

Abgesehen von den relativ wenigen Arten, bei denen die direkte Verfolgung eine grosse Rolle bei ihrem Verschwinden spielte, führt vor allem die Zerstörung beziehungsweise Fragmentierung von Lebensräumen zu einer Abnahme der Individuenzahl und erhöht so das Risiko des Aussterbens.<sup>167</sup>

---

165 Report der Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES), *Nature's Dangerous Decline. «Unprecedented» Species Extinction Rates «Accelerating»* URL: <https://ipbes.net/news/Media-Release-Global-Assessment>, 2019.

166 Inger 1966.

167 Rodolfo Dirzo, Hillary S. Young, Mauro Galetti et al., «Defaunation in the Anthropocene», in: *Science* 345:6195 (2014), S. 401–406.

Kleine Populationen in räumlich begrenzten und oft bereits negativ beeinflussten verbliebenen Lebensräumen sind deutlich anfälliger, so dass mit einer deutlichen Zunahme der Aussterberate gerechnet werden muss. Die gegenwärtig diskutierten Aussterberaten von Tier- und Pflanzenarten beruhen lediglich auf Schätzungen und Hochrechnungen. Werden jedoch die wesentlich höheren Risiken für Arten in Restlebensräumen und andererseits Bevölkerungszunahme und wirtschaftliche Entwicklung in allen Teilen der Erde berücksichtigt, dann ist eine exponentielle Beschleunigung des Verlustes von Biodiversität zu befürchten. Die Gefahr eines anthropogenen Massenaussterbens ist damit real.

Ein konkretes Beispiel mag dieses dramatische Problem veranschaulichen. Die Borneo Regenbogenkröte *Ansonia latidisca* wurde 1966 von Robert F. Inger anhand von drei Exemplaren wissenschaftlich beschrieben. Gesammelt wurden diese der Beschreibung zugrunde liegenden Tiere jedoch bereits in den zwanziger Jahren, das letzte 1924. Danach blieb die Art verschollen und war in den Top Ten der am meisten gesuchten Amphibienarten der Welt. Erst 2011, also 87 Jahre nach der letzten Sichtung dieser Art, gelang Pui Yong Min und Indraneil Das von der Universität in Kuching, Sarawak, Malaysia (UNIMAS), die Wiederentdeckung. Heute ist die Art lediglich von zwei nah beieinander liegenden Bergen bekannt. Der Typusfundort, an dem der Holotypus 1924 gesammelt wurde, ist heute ein extrem steiler, mit Montanwald bedeckter Berghang am Rande eines Golfplatzes. Die wenigen nachgewiesenen Exemplare wurden alle an alten, mit Moosen und Flechten überzogenen Bäumen gefunden. Das winzige Gebiet steht nicht unter Schutz und ist so dem Wohlwollen des Besitzers des Golfplatzes und des dazu gehörenden Hotels ausgeliefert. Neben illegalem Sammeln sind Rodungen und Bautätigkeit, die zum Verlust des letzten Lebensraums führen könnten, die grössten Gefahren für das Überleben der Borneo Regenbogenkröte. Das Fortpflanzungsverhalten und die Kaulquappen der Art sind unbekannt, was mögliche Massnahmen zu ihrem langfristigen Schutz nicht einfacher macht.

Angesichts der unbestreitbaren Tatsache der akuten Gefährdung der meisten natürlichen Lebensräume ist schon allein die Identifikation der realen Artenvielfalt ein Wettlauf gegen die Zeit. Tatsächlich ist jedoch auch über einen grossen Teil der Arten, die entdeckt und wissenschaftlich beschrieben wurden, kaum mehr als ihre Existenz bekannt. So sind zum Beispiel von

den insgesamt 6569 beschriebenen Echsenarten 927 (14,1 %) nur von ihrer Typuslokalität bekannt, also lediglich von dem Ort, wo die ersten Exemplare gefunden wurden, anhand deren die Artbeschreibung erfolgte. Davon sind sogar 736 (79 %) überhaupt nur einmal gefunden worden, eben als das Typenmaterial gesammelt wurde.<sup>168</sup> Bei den Amphibien Südostasiens sieht es nicht anders aus. Der eigentlich auffällige Red Hot Chili Pepper Frosch *Glyphoglossus capsus* (beschrieben als *Calluella capsus*) ist bislang nur von zwei Exemplaren bekannt. Eines wurde im Regenwald des Kubah Nationalparks auf Borneo in einer Falle gefangen, das zweite als Verkehrsoffer von einer Zufahrtsstrasse zu einem Golfplatz geborgen.<sup>169</sup> Vermutlich verbringt die Art wie ihre Verwandten einen grossen Teil ihres Lebens unterirdisch im Waldboden vergraben. Von der Schwarzen Witwenkröte *Ansonia vidua* wurden auf drei Reisen bisher insgesamt vier Exemplare nachgewiesen, die alle von einem wenige hundert Meter langen Abschnitt eines kleinen Bergflusses auf ca. 2 100 Meter am Bergmassiv des Gunung Murud gesammelt wurden. Alle vier waren Weibchen, sodass die Männchen, die Larven und somit der Lebenszyklus der Art unbekannt sind.<sup>170</sup> Weil noch kein männliches Tier dieser Art entdeckt werden konnte und aufgrund ihrer düster schwarzen Färbung wurde der Name Witwenkröte auch gewählt. Es besteht also ein grosser Bedarf an weiterführender Forschung, um für all die Arten die lediglich als Name und in ein paar Museumsexemplaren bekannt sind, wenigstens grundlegende Daten zu ihrer Lebensweise und ihren ökologischen Ansprüchen zu erheben. Erster und wichtigster Schritt ist allerdings die Erfassung der Artenvielfalt, nicht zuletzt da vollständige Inventare der Biodiversität die Grundlage für den Naturschutz und entsprechende politische Entscheidungen sind. Neue Schutzgebiete werden meist nur dann ausgewiesen, wenn Vorkommen seltener Arten gute Argumente dafür liefern.

---

168 Shai Meiri et al., «Extinct, obscure or imaginary: The lizard species with the smallest ranges», in: *Diversity and Distributions* 24 (2018), S. 262–273.

169 Indraneil Das, Pui Yong Min, Stefan T. Hertwig et al., «Red Hot Chili Pepper. A New *Calluella* Stoliczka, 1872 (Lissamphibia: Anura: Microhylidae) from Sarawak, East Malaysia (Borneo)», in: *Zootaxa* 3785:4 (2014), S. 550–560.

170 Stefan T. Hertwig, Pui Yong Min, Alexander Haas et al., «Dressed in Black. A New *Ansonia* Stoliczka, 1870 (Lissamphibia: Anura: Bufonidae) from Gunung Murud, Sarawak, East Malaysia (Borneo)», in: *Zootaxa* 3814:3 (2014), S. 419–431.



Oft wird die Frage gestellt, ob wissenschaftliche Sammeltätigkeit nicht auch zum Aussterben von Arten beitragen kann, da dabei Tiere aus den natürlichen Populationen entnommen werden. Die Antwort auf diese Frage ist ein klares Nein. Rund um jedes Fortpflanzungsgewässer versammeln sich die natürlichen Prädatoren der Frösche. Das sind an Land in erster Linie Schlangen, Vögel, Spinnen, oft aber auch andere Frösche; auf die Larven im Wasser lauern Fische und Libellenlarven. Jede Population muss diese permanent auftretenden Verluste durch eine entsprechende Fortpflanzungsrate kompensieren können. Die Entnahme einiger weniger Belegexemplare liegt innerhalb dieser normalen Verlustrate und führt sicher nicht zum Aussterben der Arten. Ohnehin ist schon das Finden dieser wenigen Frösche meist schwierig genug, es sei an dieser Stelle auf die zuvor bereits geschilderte Geschichte von *Kalophrynus nubicola* erinnert. Das grösste Risiko, welches von Besuchen der Lebensräume ausgeht, ist die versehentliche Einschleppung von Krankheitserregern. Bei Fröschen hat die weltweit verbreitete, durch einen Pilz hervorgerufene Erkrankung Chytridiomycose zur dramatischen Abnahme vieler Populationen oder sogar zum Aussterben von Arten geführt. Die Pilzinfektion ist auch auf Borneo nachgewiesen worden, hat dort bislang jedoch zu keinem Massensterben geführt. Umfassende Hygienemassnahmen und die Verwendung separater Ausrüstung für die Feldarbeit in verschiedenen Regionen sind trotzdem Standard.

Im Jahr 1993 wurde als wichtiges internationales Umweltabkommen die UN-Konvention über biologische Vielfalt verabschiedet. Ausgehend von dieser Konvention trat neben dem Cartagena Protokoll zur Regelung des grenzüberschreitenden Transportes und Umgangs mit gentechnisch veränderten Organismen bislang lediglich das Nagoya Protokoll am 12. Oktober 2014 in Kraft und wurde mittlerweile von 116 Staaten ratifiziert. Dieses Abkommen regelt erstmals völkerrechtlich verbindlich den Zugang zu genetischen Ressourcen und den Interessensausgleich zwischen Ursprungsländern und Ländern, in denen sie genutzt werden. Hintergrund sind reale und zurecht von den Ursprungsländern beklagte Fälle von Biopiraterie, in denen Konzerne aus Industrieländern Gewinne mit Produkten erzielten, die aus Organismen anderer Länder gewonnen oder davon inspiriert wurden. Das Nagoya Protokoll liefert nun einen völkerrechtlichen Rahmen für den Zugang zu und die Nutzung von genetischen Ressourcen.

Die Biodiversitätsforschung unterliegt ebenfalls den Regeln dieses Abkommens. Bereits die Sequenzierung von Genen zu Zwecken der Verwandtschaftsforschung und daraus folgende Publikationen werden als Nutzung angesehen, obwohl damit keinerlei ökonomischer Gewinn zu erzielen ist. Die zwischen den beteiligten Institutionen des Ursprungs- beziehungsweise des Nutzerlandes abzuschliessenden standardisierten Verträge regeln die Art der Nutzung, den Verbleib der Ressourcen sowie die Teilhabe an den zu erzielenden Resultaten, also zum Beispiel Co-Autorschaften bei Publikationen. Durch dieses Vorgehen wird ein gewisser bürokratischer Mehraufwand erzeugt, aber auch Sicherheit für alle beteiligten WissenschaftlerInnen und damit letztlich Vertrauen in langfristige Kooperationen geschaffen.

Abgesehen von diesen durchaus positiven Wirkungen muss allerdings die grundsätzliche Intention der ratifizierten Abkommen hinterfragt werden. Weder das Cartagena noch das Nagoya Protokoll werden in irgendeiner Form zur langfristigen Erhaltung der Biodiversität durch den Schutz von Arten oder Lebensräumen beitragen, denn sie regeln lediglich Aspekte ihrer Nutzung. Keines der bislang aus der UN-Konvention über biologische Vielfalt hervorgegangenen Abkommen beinhaltet verbindliche und bereits umgesetzte Regeln zur langfristigen Erhaltung der Biodiversität. Im Gegenteil, Biodiversität wird nach wie vor als ökonomisch relevante und verfügbare Ressource betrachtet, die im Besitz von Nationalstaaten steht. Die grundsätzliche Frage muss erneut gestellt werden, ob die einzigartige Vielfalt des Lebens tatsächlich auf das Niveau einer nationalstaatlich verwalteten Ressource reduziert werden darf. Angesichts der jüngsten Berichte zum Ausmass des gegenwärtigen Artensterbens<sup>171</sup> und der Klimaveränderungen<sup>172</sup> ist klar, dass diese ökonomistische Denkweise die Biosphäre und damit die Lebensbedingungen des Menschen ernsthaft gefährdet.

Mittlerweile gelten bereits mehr als 40 % aller Amphibienarten als vom Aussterben bedroht.<sup>173</sup> Neben der weltweit auftretenden Chytridiomycose

---

171 Report der Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES) 2019.

172 The Intergovernmental Panel on Climate Change, *Global Warming of 1.5 °C* URL: [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch), eingesehen Januar 2019.

173 Report der Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES) 2019.

ist die wichtigste Ursache dafür die schnell voranschreitende, grossflächige und dauerhafte Zerstörung der ursprünglichen Lebensräume. Sollten sich die Befürchtungen hinsichtlich einer dramatisch steigenden Aussterberate in Fauna und Flora als richtig erweisen, bleibt nicht mehr viel Zeit für Massnahmen zur Erhaltung eines signifikanten Teils der Artenvielfalt. Es steht daher ausser Frage, dass die dringend notwendige Erfassung der Biodiversität in buchstäblich letzter Sekunde neben umfassenden Ressourcen für die Biodiversitätsforschung auch auf die Neugier, das Engagement und die Entdeckerfreude ambitionierter ForscherInnen angewiesen ist. Wie zu Humboldts Zeit steht empirische Arbeit im Feld und im Labor am Beginn jeder Studie. Insofern haben die Leitgedanken Alexander von Humboldts nichts an Bedeutung und Aktualität verloren, seine Genauigkeit und Leidenschaft sollten auch weiterhin als Inspiration dienen. Die begeisterte Teilnahme von Studenten an Forschungsreisen, zum Teil unter abenteuerlichen und widrigen Bedingungen, sind hierfür ein gutes Zeichen.

### **Dank**

Mein Dank gilt allen Studenten, Kooperationspartnern und Kollegen die zu den Studien beigetragen haben, die diesem Artikel zugrunde liegen. Konkret stammen einige der erwähnten Beispiele aus den Arbeiten von Jana Flury, Erina Balmer, Laurence Etter und Lea Waser. Insbesondere möchte ich auch all den Menschen danken, die mich in den vergangenen Jahren bei meiner Feldarbeit begleitet und unterstützt haben. Ein besonderer Dank gebührt der Burgergemeinde Bern, die durch den Betrieb des Naturhistorischen Museums Bern als moderne Forschungseinrichtung meine Arbeit ermöglicht und zudem die Forschungsreisen und die Teilnahme von Studenten zusätzlich gefördert hat. Karin E. Lilje und Christian Kropf waren so freundlich, ihre Zeit für das kritische Lesen des vorliegenden Beitrags zu opfern.