

Spannendes im "Journal of Ornithology"

Was ist die Ursache für die Form von Vogeleiern?

Das amniotische Ei gilt als eine Neuentwicklung der gemeinsamen Stammart aller rezenten und ausgestorbenen Amnioten. Die Amnion- oder Nabeltiere sind eine Großgruppe der Landwirbeltiere (Tetrapoda), die sich im Gegensatz zu den Amphibien völlig unabhängig vom Wasser fortpflanzen können. Statt über eine kurze Embryonalphase mit anschließendem frei lebendem voll-aquatischen Larvenstadium verläuft ihre frühe Entwicklung über eine lange Embryonalphase ohne frei lebendes Larvenstadium. Ihre Embryonen entwickeln sich in einer mit Amnionflüssigkeit (Fruchtwasser) gefüllten Amnionhöhle (Fruchtblase), die unmittelbar und vollständig vom Amnion und mittelbar mehr oder weniger vollständig von weiteren extraembryonalen Membranen umgeben ist. Das amniotische Ei ist hierbei das Schlüsselmerkmal, welches die Eroberung des Landes durch diese monophyletische Gruppe maßgebend unterstützt hat. Die Eier der rezenten Amnioten (Schuppenechsen mit Schlangen und Echsen sowie Schildkröten, Krokodile, Vögel und Säugetiere) zeigen ein breites Spektrum in Form und Größe (Deeming & Ruta 2014). Die Bandbreite reicht von nahezu kugelförmig (bei den marinen Schildkröten) bis hin zu den extrem langgezogenen Eiern von manchen Schlangen. Mit Ausnahme der Vogeleier sind die Eier typischerweise ellipsenförmig und sowohl in der Längs- als auch in der Äquatorialachse symmetrisch. Die Vogeleier hingegen sind in ihrer Längsachse asymmetrisch, eben typisch „eiförmig“, mit einem spitzen und einem stumpfen Ende. Aber auch innerhalb der Vögel gibt es zwischen den Arten eine große Bandbreite in Größe und Form (Walters 1994). Manche Eulen haben zum Beispiel nahezu runde Eier, während manche Küstenvögel sehr spitzkegelige Eier legen. Seine endgültige Form erhält das Ei im letzten Teil des Eileiters, in dem die Kalkschale gebildet wird. Diskutiert wird auch, ob ein Vogelweibchen die Form seiner Eier durch den Muskeltonus in der Eileiterwand beeinflussen kann (Barta & Székely 1997; Smart 1991).

Was ist der Grund für diese Vielfalt der Eiformen im Vogelreich? Sind sie eine Anpassung an bestimmte Umweltbedingungen oder gibt es physiologische Ursachen? Diese Fragen sind bis heute noch wenig untersucht. Berücksichtigt man nur die mechanische Stabilität, ist die optimale Eiform eine Kugel (Solomon 1991). Für Vögel, die in exponierter Lage brüten, hätte diese Form jedoch den Nachteil, dass das Ei leicht weggrollen kann. Hier wären asymmetrische spitzkegelige Eier von Vorteil, da diese nur in kleinen Bögen rollen. So wäre für klippenbrütende Arten die Gefahr minimiert, dass ihre Eier herunterrollen können. Smart (1991) diskutiert zudem physiologische

Gründe für die Variabilität der Eiformen. Zum Beispiel ist die Kalkschale häufig an der stumpfen Seite luftdurchlässiger als im restlichen Bereich des Eies. In Verbindung mit der Luftkammer kann so die Gasversorgung des Embryos optimiert sein. Außerdem könnte die längliche Eiform eine Anpassung an das Vogelbecken sein, da so ein größeres Eivolumen durch den engeren Kanal gedrückt werden kann. Barta & Székely (1997) versuchten mit einem mathematischen Modell die artspezifischen Eiformen mit der unterschiedlichen Größe der Gelege zu erklären. Ihre Berechnungen zeigten, dass es für jede Gelegegröße eine optimale Eiform gibt, mit der das vollständige Gelege die Fläche des elterlichen Brutflecks thermisch optimal ausnutzt. Das Modell ergab zum Beispiel für ein Vierergelege als optimale Form spitzkegelige Eier. Für Watvögel, deren Gelege in der Regel vier Eier umfasst, hatte bereits Andersson (1978) die gleichen Vorteile einer spitzkegeligen Form beschrieben.

Für die ebenfalls birnenförmigen bzw. spitzpoligen Eier der Lummenarten *Uria* sp. wird allgemein angenommen, dass die spitze Eiform als Schutz vor dem Weggrollen von Simsen und Felsbändern entstanden ist: Je spitzer die Eier, umso enger der Bogen, den sie beim Rollen beschreiben. Das reduziere das Risiko, von schmalen Felsbändern herunterzufallen. Diese Hypothese haben drei englische Wissenschaftler nun durch einen Vergleich der Eiformen und Eimassen von Trottellummen *Uria aalge* und Dickschnabellummen *Uria lomvia* näher untersucht (Birkhead et al. 2017a). Bisher wurde die Tatsache, dass Dickschnabellummen weniger spitze Eier legen als Trottellummen, obwohl sie doch auf schmalen Felsbändern brüten, damit erklärt, dass ihre Eier leichter seien. Der Durchmesser des Bogens, den die Eier beim Rollen beschreiben, wird bei Trottellummen nicht nur von der Eiform, sondern auch von der Masse beeinflusst, wobei schwerere und damit auch größere Eier einen weiteren Bogen nehmen als leichtere (die sog. Eiform- und Eimassenhypothese). Die Wissenschaftler untersuchten nun die Eiformen in einer Population von Dickschnabellummen, deren Vögel gleichgroße Eier wie Trottellummen oder sogar noch größere Eier legen. Sie fanden zwar eine schwache, positive Korrelation zwischen Eivolumen und Spitzpoligkeit bei beiden Lummenarten, aber unabhängig von ihrer Masse waren die Dickschnabellummeneier weniger spitz als die Trottellummeneier. Damit stellen die Ergebnisse die langgehegte Vorstellung in Frage, dass ein Weggrollschutz der wichtigste Selektionsfaktor bei der Entstehung der Eiform von Trottellummen ist. Birkhead et al. (2017b) geben eine andere Erklärung für die Selektion der spitzen

Eiform bei Trottellummen. Diese Art brütet in extrem dichten Kolonien. Ihre Eier sind dadurch sehr anfällig, durch mechanische Einwirkung von Artgenossen zerstört oder durch ihre Faeces verschmutzt zu werden. Durch die spitze Eiform sind die Eier stabiler und die Verschmutzung konzentriert sich auch auf den spitzen Teil des Eies. Dadurch bleibt der stumpfe Teil relativ sauber und kann den Gasaustausch des Embryos gewährleisten, da die Schale hier besonders luftdurchlässig ist. Insgesamt zeigt diese Arbeit, dass auch in so einfachen Fragen, wie zum Beispiel warum ein Vogelei eiförmig ist, noch spannender Forschungsbedarf liegt.

Andersson M 1978: Optimal egg shape in waders. *Ornis Fennica* 55: 105-109.

Barta Z & Székely T 1997: The optimal shape of avian eggs. *Funct. Ecol.* 11: 656-662.

Birkhead TR, Thompson JE & Biggins JD 2017a: Egg shape in the Common Guillemot *Uria aalge* and Brunnich's Guillemot *U. lomvia*: not a rolling matter? *J. Ornithol.* doi:10.1007/s10336-017-1437-8.

Birkhead TR, Thompson JE, Jackson D & Biggins JD 2017b: The point of a Guillemot's egg. *Ibis* 159: 255-265.

Deeming DC & Ruta M 2014: Egg shape changes at the theropod-bird transition, and a morphometric study of amniote eggs. *R. Soc. Open Sci.* doi:10.1098/rsos.140311.

Walters M 1994: *Birds' eggs*. Dorling Kindersley, London.

Solomon SE 1991: *Egg and eggshell quality*. Wolfe Publishing Limited, Aylesbury.

Smart IHM 1991: Egg-shape in birds. In: Deeming DC & Ferguson MWJ (Hrsg) *Egg incubation: Its effects on embryonic development in birds and reptiles*: 101116. Cambridge University Press, Cambridge.

Frank R. Mattig

Schützt das Bürzeldrüsensekret die Federn vor bakteriellen Ektoparasiten?

Ektoparasiten, die im Gefieder von Vögeln leben und sich vom Keratin der Federn ernähren, sind weit verbreitet. Das Artenspektrum reicht von Federlingen (Mallophaga) bis hin zu federzersetzenden Bakterien. Ein Befall und damit der Abbau oder die Zersetzung von Federn kann gravierende Auswirkung auf die Gesundheit und Kondition des Wirtes haben (Clayton et al. 2010). So können zum Beispiel essenzielle Funktionen wie die Fähigkeit zur Thermoregulation oder die Flugfähigkeit beeinträchtigt werden. Dies hat dann z. B. Auswirkungen auf die Energiebilanz des Vogels (Booth et al. 1993) oder auch die Wahrscheinlichkeit einem Räuber zu entkommen (Møller et al. 2012). Folglich stellen Ektoparasiten einen bedeutenden Selektionsfaktor in der Evolution ihrer Wirte dar (Clayton & Moore 1997). Bei Vögeln ist aber eine Vielzahl von Abwehrstrategien bekannt (Gunderson 2008).

Die Erforschung der Beziehungen zwischen Ektoparasiten und Vögeln hat sich in den letzten Jahren auch auf die Federn abbauenden Bakterien (FDB, feather-degrading bacteria) ausgedehnt (Gunderson 2008). Die FDB sind keine einheitliche Gruppe. Unter dem Begriff werden vielmehr unterschiedliche Bakterien zusammengefasst, deren einzige Gemeinsamkeit eine keratinolytische (keratinspaltende) Aktivität ist. Die Fähigkeit, Federn zu zersetzen, ist nicht weit verbreitet. Federn enthalten einen sehr hohen Anteil an β -Keratin, ein durch Wasserstoffbrückenbindungen und Disulfidbrücken sehr stark quervernetztes und gefaltetes Faserprotein, welches chemisch sehr stabil ist. Federn sind dadurch gegen normale proteinspaltende Enzyme

inert und somit für die meisten Organismen unverdaulich. Wie die FDB die Federn nun genau zersetzen, ist noch nicht vollständig verstanden, sie sind jedoch in der Lage, die Quervernetzungen im β -Keratin chemisch aufzubrechen, so dass ihre speziellen keratinspaltenden Enzyme angreifen können.

Haben Vögel Verteidigungsmechanismen gegen die FDBs entwickelt? Hierbei könnte die Bürzeldrüse (Glandula uropygialis) eine Rolle spielen. Die Bürzeldrüse ist die einzige Hautdrüse vieler Vogelarten und auf der Oberseite der Schwanzwurzel, dem Bürzel, lokalisiert. In der zweilappigen, holokrinen Drüse wird ein öliges Sekret gebildet, das der Vogel aktiv im gesamten Gefieder verteilt. Dieses regelmäßige Einfetten ist ein wesentlicher Bestandteil der Gefiederhygiene. Sie bewahrt die Geschmeidigkeit des Gefieders und macht es wasserabweisender. Zusätzlich gibt es Hinweise, dass das Sekret auch eine fungizide und/oder eine bakterizide Wirkung hat (Clayton et al. 2010). Untersuchungen von Reneerkens et al. (2008) haben gezeigt, dass sich die Zusammensetzung des Bürzeldrüsensekretes beim Knutt *Calidris canutus* kurz vor Brutbeginn sehr schnell und komplett ändert; von einer Mischung aus Monoestern zu einer Mischung aus Diestern. Die Forscher interpretierten dies als eine Anpassung an das warme, humide Mikroklima im Nest, welches eine starke Vermehrung der federzersetzenden Bakterien begünstigt. Sie konnten zeigen, dass FDB verstärkt das Gefieder angreifen, wenn das Bürzeldrüsensekret von den Federn abgewischt wurde.

Über den Wirkmechanismus des Bürzeldrüsensekretes ist bisher nur sehr wenig bekannt. Zum Teil

konnten auch die in vitro gefundene antibakterielle Wirkung des Sekretes am lebenden Vogel nicht bestätigt werden. Vor dem Hintergrund der geringen Datenlage hat Gunderson (2008) Hinweise für vier mögliche Szenarien zusammengestellt, wie das FDB Wachstum durch das Bürzeldrüsensekret kontrolliert wird:

- Einzelne Bestandteile des vom Vogel gebildeten Bürzeldrüsensekretes haben eine antibakterielle Wirkung und töten die FDB ab.
- Das Bürzeldrüsensekret bildet auf den Federn eine physikalische Barriere, so dass die FDB die Federn nicht angreifen können.
- In der Bürzeldrüse gibt es symbiontische Bakterien, die Stoffe mit antibakterieller Wirkung produzieren.
- Das Bürzeldrüsensekret fördert das Wachstum nicht-pathogener Bakterien, die dann die FDB von den Federn verdrängen.

Fünf Forscher aus Venezuela (Verea et al. 2017) haben nun bei der neotropischen Nacktaugendrossel *Turdus nudigenis* untersucht, ob ihr Bürzeldrüsensekret sie vor federzersetzenden Bakterien schützt, die normalerweise in ihrem Gefieder vorkommen. Die Bakterienstämme mit Keratin auflösenden Eigenschaften waren zuvor aus dem Gefieder der Nacktaugendrosseln isoliert worden (Verea et al. 2014). Die Forscher konnten experimentell im „Reagenzglas“ zeigen, dass die Auflösung der Federn durch keratinzersetzende Bakterien stark verzögert wurde, wenn die Federn natürlich mit Bürzeldrüsensekret eingerieben waren (durch den Vogel). Wurde das Bürzeldrüsensekret vor der Inkubation abgerieben, zersetzten die Bakterien die Federn viel schneller. Federn, denen das Sekret erst abgerieben und denen dann frisches Sekret manuell (durch den Experimentator) wieder aufgetragen wurde, widerstanden der Zersetzung eine mittlere Zeit. Damit war der Schutz der Federn durch das Bürzeldrüsensekret bei der Nacktaugendrossel belegt.

Als nächstes erforschten Verea et al. (2017) den möglichen Mechanismus, welcher den Schutz der Federn bewirkt. Zuerst testeten sie durch Inkubation auf Kulturplatten, ob das bei den Nacktaugendrosseln gesammelte Bürzeldrüsensekret steril war. Da keine Bakterien nachgewiesen werden konnten, wurde die Hy-

pothese widerlegt, dass die Federn durch antimikrobielle Substanzen geschützt werden, die von in der Bürzeldrüse vorkommenden symbiotischen Bakterien produziert werden. Auch fanden sich keine Hinweise, dass das Bürzeldrüsensekret in Flüssigkultur einen bakterienhemmenden Effekt chemischer Natur hatte. Die Forscher hatten zur Klärung dieser Frage das Wachstum von vier Keratin auflösenden Bakterienstämmen, die normalerweise von Nacktaugendrosseln beherbergt werden, mit und ohne Bürzeldrüsensekret gemessen. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass das Bürzeldrüsensekret von Nacktaugendrosseln eine Zersetzung der Federn nicht auf chemische Weise verhindert, sondern möglicherweise mittels eines alternativen Mechanismus, wie zum Beispiel der Errichtung einer physischen Barriere, welche die federzersetzenden Bakterien von den Federn isoliert.

- Booth DT, Clayton DH & Block BA 1993: Experimental demonstration of the energetic cost of parasitism in free-ranging hosts. *Proc. R. Soc. Lond. B* 253: 125-129.
- Clayton DH, Koop JAH, Harbison CW, Moyer BR & Bush SE 2010: How birds combat ectoparasites. *Open Ornithol. J.* 3: 41-71.
- Clayton DH & Moore J (Hrsg) 1997: Host-parasite evolution: general principles and avian models. Oxford Univ. Press, Oxford.
- Gunderson AR 2008: Feather-degrading bacteria: a new frontier in avian and host-parasite research? *Auk* 125: 972-979.
- Møller AP, Peralta-Sánchez JM, Nielsen JT, López-Hernández E & Soler JJ 2012: Goshawk prey have more bacteria than non-prey. *J. Anim. Ecol.* 81: 403-410.
- Reneerkens J, Versteegh MA, Schneider AM, Piersma T & Burt EH Jr 2008: Seasonally changing preen-wax composition: Red Knots' (*Calidris canutus*) flexible defense against feather-degrading bacteria? *Auk* 125: 285-290.
- Verea C, Vitelli-Flores J, Dorta B, Isturiz T, Solórzano A, Rodríguez-Lemoine V & Bosque C 2014: Feather-degrading bacteria from the plumage of Neotropical Spectacled Thrushes (*Turdus nudigenis*). *Auk* 131: 100-109.
- Verea C, Vitelli-Flores J, Isturiz T, Rodríguez-Lemoine V & Bosque C 2017: The effect of uropygial gland secretions of Spectacled Thrushes (*Turdus nudigenis*) on feather degradation and bacterial growth in vitro. *J. Ornithol.* doi:10.1007/s10336-017-1461-8.

Frank R. Mattig

Zur Evolution des kleinen Brustmuskels mesozoischer Vögel

Seit langem beschäftigt die Wissenschaftler die Frage, wie und ab wann sich in der Evolution der Vögel die Flugfähigkeit herausgebildet hat. Eine Schlüsselrolle bei diesen Untersuchungen spielt natürlich der Urvogel *Archaeopteryx*, der als mutmaßliche Übergangsform zwischen den Reptilien und den Vögel Merkmale beider

Tiergruppen trägt. Bis heute sind erst zwölf Exemplare des Urvogels gefunden worden und alle stammen aus den Plattenkalksteinbrüchen der südlichen Frankenalb in Bayern. Untersuchungen an dem erst im Jahr 2010 gefundenen elften Exemplar zeigen, dass *Archaeopteryx* bereits deutlich gegliederte asymmetrische Federn auf-

wies (Foth et al. 2014, 2015). Er besaß Flügel mit zwölf Handschwingen, die denen der modernen Vögel in vielem ähneln. Foth et al. 2015 vermuten daher, dass *Archaeopteryx* besser fliegen konnte als vermutet.

Für die Flugfähigkeit braucht ein Vogel jedoch nicht nur Flügel und ein angepasstes Federkleid, sondern auch einen spezialisierten Bewegungsapparat, welcher die Flügel in Bewegung setzt. Dieser ist bei den modernen Vögeln im Brust- und Schulterbereich lokalisiert und äußerst komplex. Etwa 50 verschiedene Muskeln tragen zu den Bewegungen der Flügel bei. Die beiden größten und wichtigsten setzen jeweils am Brustbeinkamm (Crista sterni) und am Oberarmknochen (Humerus) an. Außen liegt der Große Brustmuskel (Musculus pectoralis), der bei Kontraktion den Flügel nach unten zieht und nach vorne dreht (Flügelabwärtsschlag). Der Kleine Brustmuskel (Musculus supracoracoideus) liegt tiefer, direkt über den Rippen und seine Kontraktion hebt den Flügel an (Flügelauwärtsschlag). Dies wird durch eine Kraftumlenkung ermöglicht, da die Sehne des Kleinen Brustmuskels durch das Dreiknochenloch (Foramen triosseum) zur Oberseite des Oberarmknochens (Humerus) zieht. Das Dreiknochenloch liegt zwischen drei Knochen des Schultergelenks, also zwischen dem Rabenbein (Coracoid), dem Schulterblatt (Scapula) und dem Gabelbein (Furcula). Durch diese Kraftumlenkung können die beiden Brustmuskeln antagonistisch (entgegengesetzt) wirken, obwohl beide am Brustbeinkamm ansetzen. Zusätzlich gibt es noch viele kleinere Muskeln, welche die genaue Stellung des Flügels kontrollieren.

Die Evolution der Flugmuskulatur der Vögel ist bisher nur unzureichend verstanden. Die meisten Studien konzentrierten sich auf *Archaeopteryx*, dessen Schulterbereich jedoch noch sehr dem der flugunfähigen Raub-saurier ähnelt. Er hatte noch kein Brustbein (Sternum) und ein kleines quadratisches Rabenbein, so dass die Ansätze der wichtigen Flugmuskulatur noch nicht richtig entwickelt waren und der Urvogel deswegen wohl keine längeren Strecken fliegen konnte. Die wichtigen

evolutionären Veränderungen hin zu einem dem Flug angepassten Bewegungsapparat müssen folglich später innerhalb der Aves aufgetreten sein. Vor diesem Hintergrund hat Gerald Mayr vom Forschungsinstitut Senckenberg die Morphologie des Schultergürtels verschiedener fossiler Vögel aus dem Erdmittelalter (Mesozoikum) näher untersucht und sich hierbei auf die Entwicklung des Kleinen Brustmuskels (Musculus supracoracoideus) konzentriert (Mayr 2017). Im Laufe der Vogelevolution verlagerte sich der Hauptursprung des Kleinen Brustmuskels vom Rabenbein auf das Brustbein. Da dort auch der Große Brustmuskel ansetzt, muss es im vorderen (kranialen) Teil des Brustbeines zu Platzproblemen gekommen sein. Mayr (2017) vermutet daher, dass dies letztlich zur Entstehung des Brustbeinkammes geführt hat. Ein gut entwickelter Kamm im vorderen Bereich des Brustbeins fehlt noch den frühkreidezeitlichen Enantiornithes. Dies ist eine Gruppe zahntragender Vögel, die am Ende der Kreidezeit ausstarb. Sie waren im Erdmittelalter weit verbreitet und unterscheiden sich in der Gelenkverbindung zwischen Schulterblatt und Rabenbein von den Ornithurae, zu denen auch alle modernen Vögel angehören. Der Aufbau des Kleinen Brustmuskels muss sich somit bei den Enantiornithes von dem der heutigen Vögel unterscheiden haben. Diese Annahme steht im Einklang mit der Tatsache, dass auch das Dreiknochenloch, welches die Sehne des Kleinen Brustmuskels bei den heutigen Vögeln umlenkt, bei den Enantiornithes nicht entwickelt war.

- Foth C, Tischlinger H & Rahut OW 2014: New specimen of *Archaeopteryx* provides insights into the evolution of pennaceous feathers. *Nature* 511: 79-82.
- Foth C, Tischlinger H & Rahut OW 2015: Als die Federn fliegen lernten. *Spektrum der Wissenschaft* 4/15: 28-33
- Mayr G 2017: Pectoral girdle morphology of Mesozoic birds and the evolution of the avian supracoracoideus muscle. *J. Ornithol.* doi:10.1007/s10336-017-1451-x.

Frank R. Mattig

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Vogelwarte - Zeitschrift für Vogelkunde](#)

Jahr/Year: 2017

Band/Volume: [55_2017](#)

Autor(en)/Author(s): Mattig Frank R.

Artikel/Article: [Spannendes im "Journal of Ornithology". Was ist die Ursache für die Form von Vogeleiern? 157-160](#)