

Signale integriert werden. Ein bedeutsamer Signalweg ist der *Sonic Hedgehog*-(Shh)-Signalweg. Durch ihn werden verschiedene Prozesse gesteuert, z. B. bei der Bildung des Neuralrohrs (embryonale Anlage des Nervensystems), der Extremitätenknospen oder auch von Strukturen der Haut wie Schuppen und Federn.

Durch Beeinflussung des Shh-Signalwegs konnten Rory L. COOPER und Michel C. MILINKOVITCH von der Universität Genf die Ausbildung von Federn auf den Füßen von Hühnern anstelle der normalerweise ausgebildeten netzförmigen Schuppen auslösen. Dies erreichten sie durch intravenöse Injektion des *Smoothened-Agonisten* (SAG) in das sich im Ei entwickelnde Hühnchen am 11. Embryonaltag. Der SAG förderte spezifisch die Shh-Signalübertragung im Hühnerembryo, was zur Ausbildung der Federn führte. Deren Ausbildung auf den Innenflächen des Fußes und der Finger (Abb. 1) war vollständig und dauerhaft; es war dazu keine anhaltende Behandlung erforderlich. Die an den „falschen“ Stellen ausgebildeten (*ektopischen*) Federn waren entwicklungsmäßig mit normalen Federn vergleichbar, die den Körper schmücken. Die Daunenfedern entwickelten sich bei erwachsenen Hühnern zu beidseitig symmetrischen Konturfedern, die nach der Mauser ersetzt werden. RNA-Sequenzierungsanalysen bestätigten, dass die Behandlung mit dem Smoothened-Agonisten die Expression (Nutzung) von wichtigen, mit dem Shh-Signalweg assoziierten Genen spezifisch fördert. Die Forscher schließen aus ihren

■ Von der Schuppe zur Feder – nur ein kleiner Schritt?

Forschern ist es gelungen, Schuppen an Hühnerfüßen in Federn zu verwandeln. Dies gelang, indem ein Gen manipuliert wurde, das eine Signalfunktion ausübt. Ist das ein wichtiger Schritt im Verständnis, wie Vogelfedern evolutionär erstmals entstanden sind?

Die Ausbildung von Organen während der Embryonalentwicklung steht unter der Kontrolle von biochemischen Signalwegen. Daran sind in der Regel zahlreiche Enzyme und Botenstoffe beteiligt. Auf diesen Signalwegen können Signale verstärkt oder auch unterschiedliche



Abb. 1 Federn statt normalen Schuppenstrukturen an den Füßen von Hühnchen durch Manipulation des Shh-Signalwegs. (© UNIGE / Cooper & Milinkovitch; CC BY 4.0)

Ergebnissen, dass „Variationen im Shh-Signalweg wahrscheinlich zur natürlichen Vielfalt und Regionalisierung [unterschiedliche Ausprägung in verschiedenen Bereichen des Körpers] der Hautanhangsgebilde von Vögeln beitragen“ (COOPER & MILINKOVITCH 2023, 1). Offenbar nimmt der Shh-Signalweg in der Hierarchie eine hochrangige Stellung ein, in der er u. a. unterschiedliche Entwicklungen der Hautanhänge reguliert.

Die Autoren nehmen in ihren letzten beiden Sätzen Bezug auf Evolution: Die Experimente hätten die „Möglichkeit eröffnet, zu untersuchen, wie evolutionäre Veränderungen in Interaktionsnetzwerken zu ausgeprägten Übergängen zwischen den Formen der Hautanhangsgebilde geführt haben“. Ihre Studie deute auch darauf hin, „dass natürliche Variationen in der Shh-Signalübertragung wahrscheinlich ein solcher evolutionärer Treiber für die Vielfalt von Schuppen und Federmustern sind“ (COOPER & MILINKOVITCH 2023, 1+11).

Doch die Schlussfolgerungen der Autoren sind nicht durch ihre Versuche gedeckt. Es wurden einfach nur normale Federn am falschen Ort ausgebildet. Alles, was für die Ausbildung von Federn erforderlich ist, war schon da (und zwar im Erbgut jeder einzelnen Hühner-Zelle) und kann durch geringfügige Eingriffe in die Steuerungsebene der Gene abgerufen werden. So wenig „eine Schwalbe schon den Sommer macht“, macht die Verstärkung eines Signalwegs eine neue Struktur. Die erstmalige *de-novo*-Entstehung von Federn erfordert koordinierte Veränderungen in zahlreichen Genen; man denke nur an den Feinbau und die ausgeklügelten Mikrostrukturen von Federn (vgl. JUNKER 2016). Darüber hinaus ist die *Homologie* (vermeintlich abstammungsbedingte Ähnlichkeit) von Schuppen und Federn nur auf einer sehr allgemeinen Ebene nachweisbar, nämlich bis zum ersten Entwicklungsstadium der Entstehung der Placode (einer Erhebung auf der Haut). Ansonsten gibt es erhebliche Unterschiede in ihrer

Morphogenese und Proteinzusammensetzung und es fehlen beispielsweise auch fossile Belege für die Entstehung von Haaren aus Reptilschuppen (DI-POÏ & MILINKOVITCH 2016). Zudem gelten nach etablierten Anschauungen Schuppen an Füßen von Vögeln evolutionstheoretisch als zurückgebildete Federn, können also deren Entstehung nicht erklären. Alles in allem folgt daraus, dass aus dem interessanten Experiment von COOPER & MILINKOVITCH (2023) *keine* Erkenntnisse zum Ursprung von Vogelfedern gewonnen werden können.

[COOPER RL & MILINKOVITCH MC (2023) Transient agonism of the sonic hedgehog pathway triggers a permanent transition of skin appendage fate in the chicken embryo. *Sci. Adv.* 9, eadg9619, doi:10.1126/sciadv.adg9619 • DI-POÏ N & MILINKOVITCH MC (2016) The anatomical placode in reptile scale morphogenesis indicates shared ancestry among skin appendages in amniotes. *Sci. Adv.* 2, e1600708, doi:10.1126/sciadv.1600708 • JUNKER R (2016) Vogelfedern und Vogelflug. 1. Was eine Evolutionshypothese erklären müsste. *Stud. Integr. J.* 23, 75–82.] R. Junker