

spaltung der beiden großen Fischgruppen (Strahl- und Fleischflosser) sich viel früher ereignet haben, als bisher vermutet wurde; aus dieser Zeit sind aber keine fossilen Überreste von Fischen bekannt. „The remains of cartilaginous, lobe-finned and ray-finned fish should populate the fossil record prior to *G. oneiros*, but nobody has found them“ (NICHOLLS 2009, 165).

Guiyu ist eines von vielen Beispielen dafür, dass frühe fossile Formen einer Gruppe eine unerwartete Merkmalskombination aufweisen: ausgeprägte Mosaikformen, die nicht als Übergangsformen interpretierbar sind. CONWAY MORRIS (2009, 1321) spricht sogar von einem „Leitmotiv“ bei solchen Übergängen, nämlich die „unerwartete Mischung“ aus primitiven und abgeleiteten Merkmalen, und nicht nur das, sondern auch die damit verbundenen vielen Parallelismen, hier zwischen den Strahl- und Fleischflossern. (Vgl. dazu auch den Artikel „Die ‘Wolke’ über den karbonischen Tetrapoden“ in dieser Ausgabe.)

[CONWAY MORRIS S (2009) The predictability of evolution: glimpses into a post-Darwinian world. *Naturwissenschaften* 96, 1313-1337; NICHOLLS H (2009) Mouth to mouth. *Nature* 461, 164-166; dort Kasten S. 165; ZHU M, ZHAO W, JIA L, LU J, QIAO T & QU Q (2009) The oldest articulated osteichthyan reveals mosaic gnathostome characters. *Nature* 458, 469-474.] R. Junker

Neuer Heiz-Mechanismus in Blüten entdeckt

Von verschiedenen Pflanzen ist bekannt, dass sie in ihren Blüten Wärme produzieren und dadurch möglicherweise den bestäubenden Insekten Energie zur Verfügung stellen. Letztere können bei höherer Temperatur eine größere Aktivität entwickeln, wovon wiederum die Pflanze profitieren kann (SEYMOUR et al. 2003). Manche Pflanzen nutzen die erhöhte Temperatur auch um flüchtige Duftcocktails verstärkt zu verbreiten (BINDER 2004).

Andere können die Temperatur sehr rasch steigern; LAMPRECHT et al. (2002) konnten 14,2 °C pro Stunde messen. Dabei kann die Temperatur in den Blüten bis zu 35 °C über derjenigen der umgebenden Luft liegen (SEYMOUR & SCHULTZE-MOTEL 1997). Dieselben Autoren haben verschiedene Heizphasen bei der Gemeinen Drachenwurz (*Dracunculus vulgaris*) sehr detailliert untersucht (SEYMOUR & SCHULTZE-MOTEL 1999). Weiter konnte bisher in Studien gezeigt werden, dass erhöhte Temperatur in den Blüten die Reproduktion der Pflanze begünstigt, u. a. durch verstärkten Besuch von Bestäubern, beschleunigtes Keimen der Pollen, gesteigertes Wachstum der Pollenschläuche, erhöhten Befruchtungserfolg, bessere Fruchtentwicklung und größere Samen.

Zwei Mechanismen zur Erhöhung der Temperatur in Blüten konnten in der Vergangenheit aufgezeigt werden. Einmal kann durch erhöhte (explosive) Stoffwechselaktivität (allgemein gesprochen:



exotherme Prozesse) in Gewebebereichen der Blüte die Wärme produziert werden. Eine andere Möglichkeit stellt die verstärkte Absorption einfallender Sonnenstrahlung dar, was durch die Konstruktion und Farbe der Blüte beeinflusst ist.

HERRERA & POZO (2010) beschreiben nun einen dritten Mechanismus zur Wärmeproduktion in den Blüten der Stinkenden Nieswurz (*Helleborus foetidus*). Diese mehrjährige krautige Pflanze öffnet ihre im Herbst entwickelten Blüten bereits im späten Winter bzw. zu Beginn des Frühjahrs. Die Autoren hatten an bergigen Standorten im Südosten Spaniens (Las Navillas und Puerto Llano) in Lagen von 1220 bzw. 1810 m über dem Meeresspiegel bereits früher beobachtet, dass die geöffneten Blüten – auch wenn die Pflanzen im Schnee standen – von Hummeln besucht wurden. Sie hatten auch bereits das Vorkommen von Hefezellen (*Metschnikowia reukauffii*) im Nektar der Blüten beschrieben. Der Nektar wird beim Besuch der Blüte durch Hummeln mit Hefezellen geimpft, und diese vermehren sich und wachsen im Nektar, wobei sie sich des darin enthaltenen Zuckers bedienen. HERRERA & POZO (2010) haben in ihrer Untersuchung durch Abdecken der Blüten die Infektion mit Hefezellen verhindert und in anderen Blüten den Nektar experimentell mit Hefezellen versetzt.

Sie konnten zeigen, dass die Temperatur im Nektar und in der Blüte bei Anwesenheit von Hefekulturen deutlich gegenüber der unmittelbaren Umgebung der Blüte erhöht war. Die Temperaturerhöhung korreliert mit der Zelldichte, d. h. je mehr Hefezellen im Nektar desto größer ist die Temperatursteigerung. Hefezellen konnten die Temperatur des Nektars gegenüber der Umgebungsluft um 5-6 °C erhöhen (bei Zelldichten von $1,5 \times 10^5$ Zellen mm^{-3}).

WIENS et al. hatten 2008 beschrieben, wie der durch Hefe erzeugte Alkohol (bis zu 3,8%) im Nektar einer tropischen Palme (*Eugeissona tristis*) die Attraktivität der Blüten für Alkohol suchende Säugtiere als Bestäuber deutlich erhöht.

Die Kooperation zwischen den beteiligten drei Partnern, Blüte der Stinkenden Nieswurz, Hefe und Hummeln muss in diesem Fall sehr fein abge-

Abb. 1: Künstlerische Darstellung von Guiyu oneiros. (GNU Freie Dokumentationslizenz)

stimmt sein, da durch das Wachstum und die Stoffwechselaktivität der Hefezellen der Zucker verbraucht wird, der üblicherweise für den Bestäuber gedacht ist; der Zuckergehalt kann aber nicht ohne Folgen beliebig abgesenkt werden. Dieses Beispiel kann dafür sensibilisieren, auch bei bekannt scheinenden Phänomenen nach komplexeren Lösungen zu suchen. Vielleicht sind diese weiter verbreitet und häufiger als man zunächst annehmen möchte. Wobei die komplexen Lösungen Fragen aufwerfen, weil sie eigentlich aufgrund natürlicher Ausleseprozesse im Optimierungsprozess eliminiert worden sein sollten.

[BINDER H (2004) Warme Stube für Bestäuber. Stud. Int. J. 11, 43; HERRERA CM & POZO MI (2010) Nectar yeasts warm the flower of a winter-blooming plant. Proc. R. Soc. Lond. B, online doi: 10.1098 /rsph.2009.2252; LAMPRECHT I, SCHMOLZ E, BLANCO L & ROMERO CM (2002) Flower ovens: thermal investigations on the heat producing plants. Thermochim. Acta 391, 107-118; SEYMOUR RS & SCHULTZE-MOTEL P (1997) Heat-producing flowers. Endeavour 21, 125-129; SEYMOUR RS & SCHULTZE-MOTEL P (1999) Respiration, temperature regulation and energetics of thermogenic inflorescences of the dragon lily *Dracunculus vulgaris* (Araceae). Proc. R. Soc. Lond. B 266, 1975-1983; SEYMOUR RS, WHITE CR & GIBERMAN M (2003) Heat reward for insect pollinators. Nature 426, 243-244; WIENS F, ZITZMANN A, LACHANCE M A, YEGLES M, PRAGST F, WURST F M, VON HOLST D, GUAN S L & SPANAGEL R (2008) Chronic intake of fermented floral nectar by wild treeshrews. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 105, 10426-10431.] H. Binder

Tiere und Pflanzen verwenden dasselbe Enzym zur Wahrnehmung von Kohlendioxid

Carboanhydrasen sind weit verbreitete Enzyme, die in zahlreichen, strukturell deutlich verschiedenen Varianten und Isoformen in fast allen Organismen vorkommen. Sie katalysieren die Reaktion von Kohlendioxid mit Wasser zu Hydrogencarbonat und Protonen und ebenso die Rückreaktion. Die Reaktionsgleichung lautet: $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$.

Die Reaktion spielt in sehr unterschiedlichen Zusammenhängen eine Rolle, so dass Carboanhydrasen eine Reihe von wichtigen Aufgaben erfüllen. So kann z. B. durch die Produktion bzw. Eliminierung von Wasserstoffionen = Protonen (H^+) der pH-Wert der Zellen reguliert werden. Die Rückreaktion zu CO_2 ist u.a. auch deshalb wichtig, weil sich diese Verbindung im Körper leichter transportieren lässt als Hydrogencarbonat.

Die Reaktion läuft zwar grundsätzlich auch spontan ab, wird aber durch das Enzym um einen Faktor 10^7 gesteigert, so dass bis 1 Million Moleküle Kohlendioxid pro Sekunde umgesetzt werden können. Entsprechend gehören Carboanhydrasen zu den schnellsten Enzymen überhaupt. Die eigentliche katalytische Aktivität wird durch ein Zinkion (Zn^{2+}) als Cofaktor bedingt.

Im menschlichen Körper sind Carboanhydrasen u.a. am Kohlendioxidtransport der roten Blutkörperchen und an der Bildung des Kammerwassers

im Auge beteiligt, sie regulieren den Säure-Base-Haushalt der Niere und sind auch das Schlüsselenzym für die Produktion von Magensäure. Bei Pflanzen spielen sie u.a. eine wesentliche Rolle bei der Photosynthese.

Dass Pflanzen und Tiere CO_2 wahrnehmen können, ist schon lange bekannt. So merkt unsere Zunge, ob wir ein Getränk mit oder ohne CO_2 trinken. Es war aber bislang unklar, wie das Schmecken von Kohlendioxid bei Mensch und Säugetieren funktioniert. Grüne Pflanzen registrieren den CO_2 -Gehalt der Luft und schließen bei ausreichendem Angebot die Spaltöffnungen, um einen möglichen Wasserverlust gering zu halten. Außerdem steuert das CO_2 -Angebot langfristig die Dichte der Spaltöffnungen pro Blattfläche. Aber auch bei Pflanzen war bisher unklar, wie die Wahrnehmung von CO_2 erfolgt.

Diese Wissenslücke konnte jetzt weitgehend geschlossen werden, indem sowohl für Tiere als auch Pflanzen gezeigt wurde, dass auch in diesem Punkt Carboanhydrasen wesentlich beteiligt sind (vgl. FROMMER 2010). Nicht ganz klar ist, ob das Enzym nur als Überträger (Transponder) fungiert, indem die Reaktionsprodukte (namentlich H^+) als Signal dienen, oder ob das Enzym als Sensor fungiert (Senzym) und bei der Reaktion die Konformation ändert, die dann von einem weiteren Protein registriert wird, das den Impuls weiterleitet.

Bei Säugern (CHANDRASHEKAR et al. 2009) sind die für die Geschmacksnote „sauer“ zuständigen Zellen der Zunge auch an der Wahrnehmung des typischen CO_2 -Geschmacks sog. kohlen säurehaltiger Getränke beteiligt. Dafür verantwortlich ist neben einer physikalischen Komponente, die die Gasbläschen registriert, vor allem die auf der Zelloberfläche lokalisierte α -Carboanhydrase 4. Die zugehörigen Zellen sind mit einer Ionenpumpe verbunden, die die weiteren Reaktionen auslöst. Die Untersuchungen wurden an Menschen und an Mäusen durchgeführt.

Bei Pflanzen (HU et al. 2010) wurde die CO_2 -Rezeption am Beispiel der Modellpflanze *Arabidopsis thaliana* (= Acker-Schmalwand) untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass bei Doppelmutanten mit defekten α -Carboanhydrasen 1 und 4 die Regulation der Spaltöffnungsbewegungen stark gestört ist, und dass diese Störung erstaunlicherweise durch Zugabe von α -Carboanhydrase 2 aus Säugerzellen kompensiert werden kann. Die durch die Carboanhydrasen vermittelte Regulation der Spaltöffnungen ist nicht direkt von der Photosyntheseleistung abhängig. Die Enzyme sind innerhalb der Schließzellen lokalisiert und die von ihnen katalysierte Reaktion setzt offenbar die für das mechanische Öffnen und Schließen der Spaltöffnungen letztlich verantwortliche Ionenpumpe in Gang.

So finden sich also für die Wahrnehmung von CO_2 in so verschiedenen Organismen wie Säugern und grünen Pflanzen grundsätzlich gleiche Mecha-