

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. kohlenensäurehaltiger 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-

nismen. In einem Kommentar in der Zeitschrift *Science* weist FROMMER (2010) auf diese erstaunliche Parallele hin und stellt heraus, dass beide Mechanismen unabhängig voneinander evolviert sein müssen, da die jeweils verwendeten Enzyme bezüglich ihrer Aminosäuresequenz und ihrer Struktur stark verschieden sind und an unterschiedlichen Stellen wirken, da sie in einem Fall außerhalb, im anderen Fall innerhalb der Zelle lokalisiert sind. Vor dem Hintergrund einer zufälligen Entstehung der Organismen geht er davon aus, dass das Vorliegen gleicher Funktionen deshalb so bemerkenswert ist, weil sich die zu den Pflanzen und die zum Menschen führenden Linien vor mehr als 1 Milliarde Jahren getrennt haben. Wenn wir alternativ zu diesem Denkansatz hinter der Entstehung der Lebewesen einen Plan sehen, überrascht es nicht, dass für gleiche Funktionen auch gleiche Mechanismen verwendet werden.

[CHANDRASHEKAR J et al. (2009) The Taste of Carbonation. *Science* 326, 443-445; FROMMER WB (2010) CO₂ common Sense. *Science* 327, 275-276; HU H et al. (2010) Carbonic anhydrases are upstream regulators of CO₂-controlled stomatal movements in guard cells. *Nat. Cell Biol.* 12, 87-95.]
H. Kutzelnigg

DNA aus Fossilien eines Eisbären – neue Einsichten in deren Entstehungsgeschichte

Auf der zu Spitzbergen (Norwegen) gehörenden schmalen Insel Prinz Karls Forland wurde kürzlich ein fossiler Unterkiefer (linker Bogen mit Zähnen) eines Eisbären gefunden (INGOLFSSON & WIIG 2009). Untersuchungen zur ¹⁴C-Datierung an einem Eckzahn ergaben ein Alter von mehr als 45 000 Jahren; aufgrund weiterer Untersuchungen (Stratigraphie, Ablagerungszusammenhänge und Infrarot-angeregte Lumineszenz von Sedimenten) gaben die Autoren ein Alter von 130 000 bis 110 000 Jahre an. Damit ist dieses Fossil der mit Abstand älteste fossile Beleg für Eisbären, von denen im Übrigen extrem wenige Fossilien bekannt sind (INGOLFSSON & WIIG 2009).

In einem ersten Schritt untersuchten LINDQVIST und ihr Team (2010) die gesamte DNA, die sie aus der Probe des Eckzahns gewinnen konnten, d. h. auch DNA aus anderen Quellen (s. u.). Dazu nutzten sie modernste Sequenzierungstechnologie („next generation“ sequencing technology), wobei aus kleinen Proben – auch von degenerierter DNA aus Fossilien – viele kurze DNA-Sequenzen erhalten und parallel analysiert werden.

Durch Datenvergleich konnten die Autoren feststellen, dass ca. 40% der DNA-Sequenzen dem Eisbären zuzuordnen sind, während ca. 55% bakteriellen und 4,5% menschlichen Ursprungs sind. Die Länge der gefundenen Fragmente und der hohe Anteil an Eisbären-DNA (größtenteils DNA aus dem Zellkern) bestätigen die Bedeutung von



tiefen Temperaturen über lange Zeit, Vereisung und Permafrost-Umgebung für Erhaltung fossiler DNA.

Aus insgesamt 482 364 Sequenzfragmenten konnten 1290 der mitochondrialen DNA (mt DNA) des Eisbären zugeordnet werden. Damit konnte das mt-Genom 14 mal gelesen werden, was die Fehlerhaftigkeit der Sequenzdaten reduziert.

Für Vergleichszwecke wurden die mt-Genome von sechs weiteren heute lebenden Bären analysiert. Die so gewonnenen sieben mt-Daten bildeten zusammen mit weiteren Literaturdaten die Grundlage für phylogenetische Studien.

Das errechnete Kladogramm (Ähnlichkeitsbaum) bestätigte die Ergebnisse bisheriger Studien und zeigt darüber hinaus überraschenderweise, dass der fossile Eisbär unmittelbar in der Nähe der Aufspaltung zwischen Eisbären und Braunbären von den zu Alaska gehörenden ABC-Inseln liegt. Der fossil überlieferte Eisbär wird also sehr nahe bei dem letzten gemeinsamen Vorfahren von Braunbär und Eisbär angenommen.

Die Daten, zu deren Absicherung die Autoren auch noch weitere Datensätze herangezogen haben, weisen auf eine vergleichsweise junge und schnelle Ausbreitung der modernen Eisbären im gesamten Bereich der Arktis seit dem Pleistozän hin.

Untersuchungen über Isotope in dem fossilen Eckzahn ($\delta^{13}\text{C} = -13,9\text{‰}$ und $\delta^{15}\text{N} = -19,4\text{‰}$) deuten auf Ernährungsgewohnheiten (marine Beutetiere) wie bei modernen Eisbären hin (gleichzeitig unterscheiden sie sich deutlich von denen fossiler und moderner Braunbären). LINDQVIST et al. (2010) betonen abschließend, dass ihre Untersuchungen darauf hindeuten, dass frühe Eisbären sich extrem rasch in morphologischer und physiologischer Hinsicht ihrem heutigen einheitlichen Lebensraum angepasst haben (und zwar innerhalb von nur 10 000 – 30 000 Jahren nach der Aufspaltung mit den Braunbären).

Mit dieser Untersuchung von fossiler DNA ist ein weiteres Beispiel von sehr rascher Evolution

Abb. 1: Im Visier der Genomforschung: der Eisbär, *Ursus maritimus*. (Creative Commons Lizenz)