

typen. Sie konnten zeigen, dass etwa 15% der Codons eines Gens (also den Basentriplets, die sonst für eine Aminosäure codieren) in rund 87% der menschlichen Gene auch in die Bindung mit Transkriptionsfaktoren einbezogen werden. Die Autoren bezeichnen diese Genbereiche als „Duone“ und bringen damit zum Ausdruck, dass sie Information auf zwei Weisen codieren: einmal „klassisch“ für Proteine und zusätzlich durch die Bindung der Transkriptionsfaktoren für Regulation der Gene.

Die Wechselwirkung eines Proteins mit einer DNA-Sequenz, die gleichzeitig ein Protein codiert, stellt besondere Anforderungen an die genutzten Codons und die dadurch festgelegten Aminosäuren. STERACHIS et al. untersuchten die Auswirkung des Austausches einzelner Nukleotide in Duonen auf die Fähigkeit, Transkriptionsfaktoren zu binden. Zunächst stellten sie dazu die bekannten genetischen Varianten zusammen, die mit Krankheiten oder mit einer veränderten Funktion der Duonen in Zusammenhang gebracht werden. Mehr als 17% der Duonen, in denen einzelne Nukleotide ausgetauscht waren, zeigten eine veränderte Bindung der Transkriptionsfaktoren. Der Austausch von synonymen Codons, die also für dieselbe Aminosäure in den Proteinen codieren, führt zwar zum selben funktionsfähigen Protein, jedoch zu einer Veränderung der Bindung der Transkriptionsfaktoren. Dieser Befund deutet darauf hin, dass einige Änderungen in Duonen hauptsächlich ihre Transkriptionsfaktor-Bindung beeinflussen. Änderungen in der DNA-Sequenz können somit offensichtlich auch dann Krankheiten verursachen, wenn sie gar nicht zu Modifikationen in Proteinen führen. Der Austausch einzelner Nukleotide (single nucleotide polymorphism; snp) im Genom kann also auf vielfältige Weise einen Organismus beeinflussen; das gesamte Spektrum von regulatorischen Codes muss somit in Betracht gezogen werden.

Die Erkenntnis, dass im Genom verschiedene Codes enthalten sind und genutzt werden, eröffnet Einblicke in eine „Violdimensionalität“ des Genoms. Diese erst ansatzweise

verstandene Komplexität des Erbguts kann zum Staunen führen und eröffnet völlig neue Fragestellungen. Bisherige Vorstellungen zur Entstehung der im Genom abgespeicherten Information müssen neu überdacht werden, da die DNA-Sequenzen mit einer bisher ungeahnten Vielfalt an Codes abgelesen werden (s. z.B. auch FELLNER et al. 2014).

¹ Aufgrund der Degeneration des genetischen Codes werden dieselben Aminosäuren durch verschiedene Codons codiert. Die Bindung von Transkriptionsfaktoren an die DNA hat aber einen Einfluss auf die Wahl der verwendeten Codons für eine bestimmte Aminosäure. [FELLNER L, BECHTEL N, WITTING MA, SION S, SCHMITT-KOPPLIN P, KEIM D, SCHERER S & NEUHAUS K (2014) Phenotype of *htgA* (*mbiA*), a recently evolved orphan gene *Escherichia coli* and *Shigella*, completely overlapping in antisense to *yaaW*. FEMS Microbiol. Lett. 350, 57-64; TERGACHIS AB, HAUGEN E, SHAFER A, FU W, VERNOT B, REYNOLD A, RAUBITSCHKE A, ZIEGLER S, LEPROUSR EM, AKEY JM & STAMATOYANNOPOULOS JA (2013) Exonic transcription factor binding directs codon choice and affects protein evolution. Science 342, 1367-1372; WEATHERITT RJ & BABU MM (2013) The hidden codes that shape protein evolution. Science 342, 1325-1326; WATSON JD & CRICK FHC (1953) Molecular structure of nucleic acids. Nature 171, 737-738.] H. Binder

■ Bienen im Anflug

Honigbienen sind vermutlich die am besten wissenschaftlich untersuchten Insekten. Das liegt einerseits an ihrem ungeheuren Nutzen für uns Menschen als Honiglieferanten und als Bestäuber unserer Nutzpflanzen. Andererseits sind sie nicht nur als Einzeltiere, sondern auch als „Superorganismus“ faszinierende Studienobjekte. Doch selbst bei einem so intensiv untersuchten Lebewesen kommt es immer wieder zu neuen Entdeckungen. Eine der jüngsten wissenschaftlichen Überraschungen liefert das Navigationsvermögen der Bienen und der dazu verwendete optische Steuerungsmechanismus. Forscher aus Schweden (Emily BAIRD), Deutschland (Norbert BOEDDEKER) und Australien (Michael R. IBBOTSON, Mandyam V. SRINIVASAN) konnten nachweisen, dass Bienen ihre Anfluggeschwindigkeit anhand optischer Eindrücke steuern (BAIRD et al. 2013). Bewegt man sich z.B. fliegend wie die Biene

auf ein Objekt mit einem bestimmten Umfang zu, vergrößert sich der scheinbare Durchmesser des Objektes innerhalb des zur Verfügung stehenden Gesichtsfeldes (Bildfeld) dem Strahlensatz entsprechend. Die Geschwindigkeit der Objektgrößenänderung innerhalb des Gesichtsfeldes korreliert mit der Variation der Annäherungsgeschwindigkeit. Beim gebremsten Anflug beispielsweise verlangsamt sich die Vergrößerung, bis bei Stillstand vor dem Objekt auch die Vergrößerung innerhalb des Gesichtsfeldes zum Stillstand kommt. Über diesen optischen Effekt der prozentualen Größenänderung eines Objektes innerhalb des Gesichtsfeldes steuern Bienen ganz offensichtlich die Geschwindigkeit ihres Anfluges z. B. an eine Blüte.

Um herauszufinden, ob Bienen sich mit Hilfe dieses Effekts an Objekte annähern, benutzten die Forscher eine Spirale, mit der sie ein optisches Täuschungsmanöver durchführten. Dies bildete den Kern des erforderlichen Versuchsaufbaus, um das entscheidende Element der Bienenavigation überprüfen zu können. Eine sich Richtung Krümmungsmaximum drehende schwarze Spirale auf weißem Grund täuscht eine Annäherung an deren Zentrum vor, selbst wenn man den Abstand zur Spirale unverändert beibehält. Dreht sich die Spirale anders herum, ist der Effekt gegenläufig. Es entsteht dann der Eindruck, dass man sich vom Mittelpunkt der Spirale entfernt. In der Mitte sich drehender Spiralen wurde im Versuch attraktives Futter angeboten. Die anfliegenden Bienen konnten so nachweislich manipuliert bzw. eine größere oder geringere Anfluggeschwindigkeit vorgetäuscht werden. Entweder stoppten die Bienen daraufhin ihren Flug weit vor der vermeintlichen Futterquelle oder sie kollidierten kaum gebremst mit der Scheibe. Die Art der Abstandskontrolle bei der Navigation während des Landeanfluges war damit nachgewiesen.

Solche Beispiele animieren Forscher zur Nachahmung in der Technik. Flugzeuge und Helikopter nutzen bisher sehr aufwändige Systeme, um den Landeanflug zu steuern. Hierbei werden vor allem



Abb. 1 Über ein geniales Navigationsvermögen verfügen Bienen. (Foto: W. BORLINGHAUS)

Geschwindigkeit und Zielentfernung permanent erfasst und in Beziehung zueinander gesetzt. Der Rechenaufwand ließe sich nach der genial einfachen Methode der Bienen (möglicherweise auch der anderer Insekten) minimieren, wenn man deren Vorgehensweise technisch präzise und sicher genug umsetzen könnte. Die Bienen-Methode hat nämlich den Vorteil, dass weder die exakte Geschwindigkeit noch die Entfernung bekannt sein muss, um einen korrekten Anflug inklusive Landung durchführen zu können. Das Beispiel zeigt, dass klug eingesetzte Vereinfachungen zur besseren Funktionalität eines hochkomplexen Organismus beitragen können. In diesem Fall wird eine extrem schnelle Datenverarbeitung im Bienenhirn ermöglicht. Eine solche „Vereinfachung“ kann sicher nicht als primitiv oder gar als Rückschritt gedeutet werden, wenn sie Bestandteil eines stimmigen Gesamtkonzepts ist.

[BAIRD E, BOEDDEKER N, IBBOTSON MR & SRINIVASAN MV (2013) A universal strategy for visually guided landing. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 110, 18686-18691.] W. Borlinghaus

■ Zahnräder bei Zikadenlarven

Zahnräder sind bereits in einfacher Form seit der Antike bekannt. Damals wurden Holzstücke von außen in Radreifen aus Holz gesteckt. Sogenannte Göpel bildeten einfache Kraftübertragungs-Getriebe. Diese wurden z.B. im Mittelalter bei Mahlwerkzeugen angewandt und besaßen oft einen „Pferdeantrieb“. Leonardo da Vinci experimentierte im 15. Jhd. mit Zahnradern und entwickelte entsprechende Getriebe, die seiner Zeit weit voraus waren. Zahnräder sind eine ideale Form der Kraftübertragung bei sich drehenden Wellen. Unterschiedliche Durchmesser ermöglichen bei komplexeren Getrieben unterschiedliche Drehzahlen. Zahnräder und deren Weiterentwicklungen finden sich in unzähligen Anwendungsbereichen. Besonders hochwertig sind mechanische Uhrwerke als Meisterwerke der Zahnradtechnik. Das Entscheidende beim Zahnrad ist die Kraftübertragung möglichst ohne Spiel. Dazu müssen die einzelnen Zähne eine

spezielle abgerundete Form aufweisen, um den Kraftschluss permanent aufrecht zu erhalten. Die abgerundete Form verhindert außerdem, dass sich die ineinander greifenden Zähne verklemmen. Dadurch werden Abrieb und Materialermüdung minimiert.

Die einfache Form der Zahnrad-Funktion, die Synchronisation von Bewegungen wurde 2013 bei der Käferzikaden-Larve *Issus coleoptratus* in Form zweier Zahnkränze nachgewiesen und damit ist diese Mechanik nachweislich keine Erst-Erfindung des Menschen. Der Deutsche Klaus SANDER hatte zwar bereits in den 1950er Jahren zahnradähnliche Strukturen bei Zikaden-Larven entdeckt, doch wurde erst durch die Beobachtungen und Hochgeschwindigkeits-Zeitlupenaufnahmen von Malcolm BURROWS von der University of Cambridge und Gregory SUTTON von der University of Bristol die genaue Funktion sichtbar gemacht und nachgewiesen. Die „Zahnräder“ sitzen an den Innenschenkeln der Zikaden-Larve und synchronisieren