

# Vom Design in der Natur

**Survival of the fittest: Was eigentlich dahinter steckt, ist nicht immer offensichtlich. Heute stehen schnelle Veränderungen von Populationen im Mittelpunkt des Interesses. Ihre Erforschung könnte auch wichtige Fragen zu den Problemen der Menschheit im 21. Jahrhundert beantworten.**

VON PAUL SCHMID-HEMPEL

Die Mehrzahl der Menschen würde vermutlich den Begriff «Evolution» mit Fossilien, Dinosauriern, Jahrmillionen oder Charles Darwin verbinden. Diese Assoziationen treffen alle zu. Allerdings wäre es falsch, das damit angesprochene Wissensfeld als eine Beschäftigung mit Vergangenen abzuqualifizieren oder anzunehmen, es befasse sich mit Dingen, die für den Menschen unwichtig sind. Ganz im Gegenteil ist die moderne Evolutionsbiologie eines der aktivsten Forschungsfelder der heutigen Life Sciences.

Es geht dabei nicht nur um die Entstehung der riesigen Vielfalt der Organismen dieser Erde oder um die Lebensweise der Dinosaurier – was zwar schon Motivation genug wäre. Vielmehr integriert dieses Forschungsfeld verschiedene Fragen aus der modernen Ökologie, Ethologie, Populationsbiologie, Populationsgenetik oder der Molekularbiologie. Dabei stehen die fortlaufenden schnellen Veränderungen in Populationen im Mittelpunkt des Interesses. Die vielfältigen Konsequenzen dieser Prozesse sind für die grossen Menschheitsprobleme des 21. Jahrhunderts von unmittelbarer Bedeutung: Wie wirkt sich Genveränderung bei der Nahrungsmittelproduk-

tion aus? Wie wird die biologische Diversität aufrechterhalten? Was sind die biologischen Folgen des Klimawandels? Wie entsteht Resistenz bei Krankheitserregern? Welchen dynamischen Gesetzen folgt eine Epidemie? Welches ist die beste Impfstrategie? Viele Prozesse, wie frequenzabhängige Selektion, genetische Drift, Genfluss, Epistase, Mutation, genomische Konflikte und andere, spielen dabei eine Rolle. Diese Prozesse werden durch ökologische Interaktionen zwischen den Organismen und ihrer Umwelt bestimmt und hinterlassen Spuren in der Veränderung der genetischen Struktur der Populationen, führen also zu evolutiven Veränderungen. Da sich diese komplexen Fragen unserer Anschauung weitgehend entziehen, sind quantitative Ansätze mittels mathematischer Modelle oder numerischer Simulationen unerlässlich.

Es wird oft vergessen, dass die belebte Welt hierarchisch organisiert ist. Zum Beispiel ist die Zelle die grundlegende Organisationseinheit des lebenden Organismus. Der «Zweck» einer Zelle, ihre Gestalt oder biochemische Signatur wird deshalb verständlich, wenn man deren Funktion und Integration im individuellen Organismus kennt. Dagegen ist die Population die grundlegende Organisationseinheit auf der nächsthöheren Ebene des ökologischen und evolutiven Geschehens. Die Prinzipien, welche die Entwicklung, die Struktur oder die Dynamik der Population bestimmen, sind deshalb nicht dieselben. Auch die Kenntnis von DNA-Sequenzen, Zellfunktionen oder Molekülstrukturen ist, obwohl hilfreich, völlig ungenügend. Das Verständnis der wichtigen Vorgänge in Populationen beruht vielmehr auf den fundamentalen Gesetzen der Evolutionsbiologie, auf der ökologischen und genetischen Dynamik innerhalb und zwischen Populationen und auf den

---

Dr. Paul Schmid-Hempel ist ordentlicher Professor für Experimentelle Ökologie an der ETH Zürich.

daraus resultierenden individuellen, «eigen-nützigen» evolutions-stabilen Strategien der Organismen.

Nach den fundamentalen Gesetzen der Evolution können Populationen sich nur an verändernde Umwelten anpassen, falls genügend genetische Variation vorhanden ist. Für sich alleine genommen würde die natürliche Selektion die vorhandene Variation jedoch schnell erodieren, da vor allem die bestangepassten Typen selektioniert werden. Welche Prozesse aber können Variation erzeugen und von den Evolutionsgesetzen erhalten werden?

#### Wirte, Parasiten und Vererbung

Genetische Variation wird beispielsweise erzeugt durch den Vorgang der Rekombination bei der sexuellen Vermehrung. Die daraus resultierende vorteilhafte Konsequenz für die Anpassungsfähigkeit der Population ist dabei aber nur der Nebeneffekt. Wichtiger ist der Vorteil für den individuellen Elter, seine Nachkommen genetisch zu diversifizieren, d. h., die elterlichen Gene in immer neuen Kombinationen weiterzugeben. Theoretische Modelle demonstrieren, dass es unter anderem die raschen Evolutionsprozesse zwischen Wirten und ihren Parasiten sind, die hier eine wesentliche Rolle im Naturhaushalt spielen dürften. Parasiten können sich nämlich sehr schnell an die vorherrschende Abwehrstrategie der Wirte anpassen – ein Evolutionsvorgang also, der innerhalb weniger Generationen abläuft. Die schnelle Entstehung von Antibiotika-Resistenz bei bakteriellen Erregern liefert ein eindruckliches Beispiel dafür. Diese Anpassung zwingt nun die Wirte, sich schnell und in einer zufälligen Richtung zu verändern – genau das, was durch die Rekombination erreicht wird. Der Anpassungsvorgang geschieht dann zwar von neuem, doch auch die Wirte verändern sich schnell.

Analytische und rechnerische Modelle zeigen, dass ein solcher schnell ablaufender Vorgang der Koevolution – gewissermaßen ein permanenter Tanz der Akteure um den gleichen Punkt herum – dazu führt, dass die genetische Variation innerhalb einer



Bild: zög

Population für sehr lange Zeit aufrechterhalten bleibt und dass Rekombination von Vorteil ist. Die riesige Vielfalt und ein hohes Alter (mehrere Dutzend Millionen Jahre) der verschiedenen Varianten des MHC-Locus, eines Genkomplexes bei höheren Wirbeltieren, der mit der Erkennung fremder Dinge im Körper zu tun hat, zeugt von der Macht dieser hoch dynamischen evolutiven Vorgänge.

Doch lässt sich dieses auch experimentell verifizieren? Untersuchungen am Beispiel des gut untersuchten Modellsystems von *Bombus terrestris* (der Dunklen Erdhummel) und ihren Parasiten belegen dies. Es ist zwar schwierig, die Rekombinationsrate experimentell und kontrolliert zu verändern,

Evolution erzeugt Vielfalt und Komplexität. Die Staaten sozialer Insekten sind ein Beispiel komplexer biologischer Organisation, deren Diversität diejenige anderer Tiere weit übersteigt. (Bild: *Bombus terrestris*)

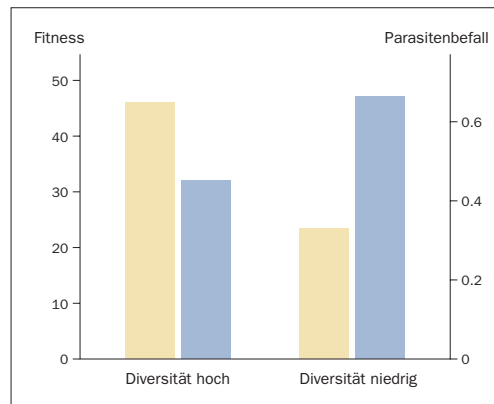


Abb. 2: Der Vorteil genetisch diversifizierter Nachkommen im Feld-Experiment. Familien von Müttern mit hoher genetischer Diversität haben weniger Parasitenbefall (blau) und eine höhere Fitness (gelb) als solche mit niedriger Diversität. (Quelle: Baer und Schmid-Hempel 1999, Nature 397: 151)

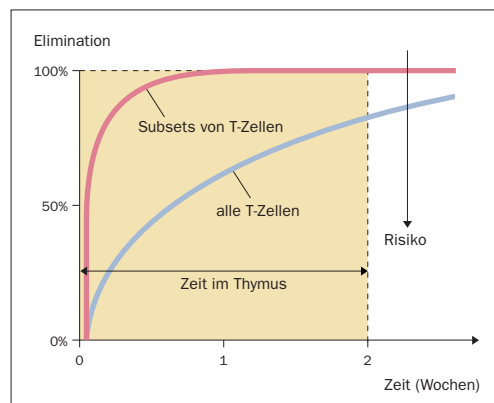


Abb. 3: Die theoretische Analyse zeigt, dass die verfügbare Aufenthaltsdauer im Thymus (gelbe Zone) bei unstrukturierter Entfernung (blau) selbstreaktiver T-Lymphozyten nicht ausreicht, um das Risiko der Autoimmunreaktion genügend zu senken. Dagegen kann eine Strategie der gezielten Elimination von geeigneten Subsets (orange) das Risiko minimieren. (Quelle: Müller & Bonhoeffer, 2003, Curr. Op. Immunol., in press)

doch Familien unterschiedlicher genetischer Diversität lassen sich durch experimentelle Insemination erzeugen. Es zeigt sich, dass Mütter mit hoher Diversität in der Nachkommenschaft (erzeugt durch viele Väter) unter natürlichen Bedingungen nicht nur weniger Parasitenbefall, sondern auch eine höhere Reproduktionsleistung erzielen als solche mit niedriger Diversität (wenige Väter). Diversifikation in einem Umfeld, das von der Wirkung von Parasiten mitbestimmt wird, hat also einen direkten, individuellen Vorteil für die Eltern und führt zur Aufrechterhaltung hoher genetischer Vielfalt in einer Population.

#### Virulenz vs. Immunabwehr

Neue Ansätze in der Evolutions- und Populationsbiologie führen nicht nur zu neuen Erkenntnissen in derartigen Fragen. Auch viele andere Aspekte von Wirt-Parasit-Interaktionen können so analysiert werden. Beispielsweise unterliegt auch die Virulenz eines Parasiten oder die Immunabwehr des Wirtes letztlich den Gesetzen der Evolution. Sinngemäß zum bisher Gesagten ist eine geringe Schädlichkeit des Parasiten nicht durch dessen übergeordnetes Interesse erklärbar, die Wirtspopulation zu erhalten. Vielmehr wird die evolutions-stabile Strategie eines Parasiten zum Beispiel durch die Balance zwischen der Vermehrung und Virulenzwirkung im jetzigen Wirt und der Wahrscheinlichkeit der Transmission zum nächsten Wirt bestimmt. Auch die mässige Immunantwort eines Wirtes ist nicht die Folge eines «Nichtangriffspakts» mit dem Parasiten. Eine dosierte Immunantwort ist vielmehr Teil einer evolutions-stabilen Strategie, die durch Kosten und Nutzen für die Wirtsfitness verständlich wird.

Es ist leicht einzusehen, dass eine Immunantwort Vorteile für den Wirt bietet. Doch was sind die Kosten? Dazu gehört

sicherlich das Risiko, dass sich die Immunantwort gegen den eigenen Körper richtet statt gegen den Eindringling. Bei Säugertieren kann dies geschehen, weil einige der T-Zellen selbst-reaktiv sind, d.h. auf das eigene Körpergewebe ansprechen und eine fatale Autoimmun-Reaktion auslösen können. Bei der Reifung dieser Zellen im Thymus, dem primären lymphatischen Organ des spezifischen Immunsystems, werden deshalb diejenigen schon vorgängig eliminiert, die selbst-reaktiv sind. Überlegungen zeigen aber, dass dafür gar nicht genügend Zeit zur Verfügung steht. Die evolutive Optimierungsaufgabe besteht also darin, einen Kompromiss zwischen grösstmöglicher Zell-Diversität und dem Risiko der Selbst-reaktivität zu finden. Doch Kosten entstehen nicht nur durch Autoimmunität, auch die direkten energetischen Kosten können beträchtlich sein. Wiederum am Modellfall von *Bombus terrestris* lässt sich zeigen, dass eine experimentelle Aktivierung des Immunsystems – ohne die negativen Folgen einer tatsächlichen Infektion – so hoch sind, dass die Überlebenschancen des Individuums um bis zu 50% tiefer sind. Die Nachteile einer nicht vollständig bekämpften Infektion sind deshalb unter Umständen weniger gravierend als die Nachteile einer starken Immunantwort. Obwohl diese Vorgänge auf Zellen und Molekülen beruhen, sind die Konzepte und Gesetzmässigkeiten der Evolutions- und Populationsbiologie gefordert, um den «Zweck» dieser Anpassungsvorgänge zu verstehen.

#### Grundlagenwissen mit Folgen

Evolution findet in Populationen statt, erzeugt Vielfalt und hat Auswirkungen auf die Funktion aller Systeme eines Organismus. Die Herausforderung ist herauszufinden, welche evolutionsstabilen Strategien dafür verantwortlich sind. Viele wichtige An-

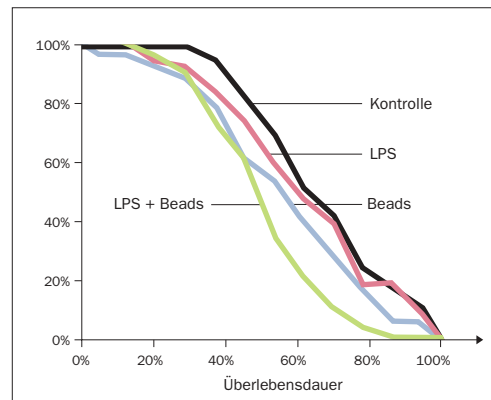


Abb. 4: Wird die Immunabwehr von Insekten durch Injektion von LPS (rot), von Sephadex Beads (blau) oder von beidem (grün) experimentell aktiviert, so sinkt die momentane Überlebenswahrscheinlichkeit um 50% im statistischen Vergleich zur Kontrolle (schwarz). (Quelle: Moret und Schmid-Hempel 2000, Science 290: 1166)

wendungen dieses Forschungsfeldes sind ersichtlich, von der Biomedizin bis zum Naturschutz. Auch die Katalogisierung von DNA-Sequenzen, die heute im Rahmen der Genomik vorangetrieben wird, kann letztlich nur mit Hilfe der evolutiven und populationsgenetischen Gesetzmässigkeiten richtig interpretiert werden. Überlegungen aus der Evolutionsbiologie haben auch schon längst Eingang gefunden in die Ingenieurwissenschaften, sei es für das Design von Maschinenteilen oder von effizienten Algorithmen in den rechnergestützten Wissenschaften. Neben dieser Fülle offensichtlicher Anwendungen soll auch im Zeitalter der Ökonomisierung der Wissenschaften nicht vergessen werden, dass es den denkenden Menschen seit jeher dazu gedrängt hat zu verstehen, wie er selbst und die Lebewesen um ihn herum entstanden sind und welche Prozesse ihre Vielfalt aufrechterhalten oder Neues entstehen lassen.

