

**HEIDELBERGER
JAHRBÜCHER
ONLINE**
Band 6 (2021)

Gesellschaft der Freunde
Universität Heidelberg e.V.



Intelligenz: Theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen

Rainer M. Holm-Hadulla, Joachim Funke & Michael Wink (Hrsg.)

HEIDELBERG
UNIVERSITY PUBLISHING

Das intelligente Spiel mit Zufällen und Auslese

CLAUDIA ERBAR & PETER LEINS

Centre for Organismal Studies (COS) Heidelberg – Biodiversität und
Pflanzensystematik, Universität Heidelberg

Zusammenfassung

Gleichgültig, ob als aus der Organismischen Evolution hervorgegangenes oder vom Menschen hergestelltes Produkt, wenn es den Anspruch optimaler Funktionalität bei gleichzeitiger Sparsamkeit erhebt, wird ihm im Sprachgebrauch vielfach das Adjektiv „intelligent“ verliehen. Mit „intelligent“ ist natürlich nur der Urheber gemeint: Im einen Fall die Evolution mit ihrem intelligenten Spiel mit den Zufällen und der Auslese, im anderen die Kreativität des „Säugetiers“ *Homo sapiens*. Bemerkenswert ist eine gewisse Parallelität in Bau und Funktionalität unabhängig voneinander entstandener Geräte und Systeme. Oder aber von der Natur vorgegebene Konstruktionen dienen als Vorbild, was zur Bionik als eigene Wissenschaftsdisziplin geführt hat. Aus der unüberschaubaren Fülle intelligenter Problemlösungen sind in diesem Artikel einige wenige herausgegriffen. Sie betreffen zunächst Gebrauchsgegenstände aus dem Alltag. Es sind z. B. Salzstreuer, die fürs Frühstücksei geeignet sind, Haftvorrichtungen wie Saugnäpfe, klebende Haftscheiben und – allen voran – Klettverschlüsse. Im Hinblick auf die Stabilität von Oberflächen, besonders was die Kratzfestigkeit betrifft, können verschiedene Möglichkeiten bei Pflanzen aufgezeigt werden. Eine mechanische Stabilität bei starker Krafteinwirkung z. B. durch Wind oder Gewichtsbelastung liefert statt einer ebenen Fläche eine gefaltete, wie sie uns bei den Palmblättern begegnet. Faltstrukturen zu einem Zylinder geschlossen ermöglichen eine beträchtliche Volumenveränderung bei gleichbleibender Oberfläche; ein solcher

Blasebalg- bzw. Ziehharmonika-Effekt gestattet Rippenkakteen eine Wasseraufnahme (bei Regen) bzw. einen Wasserverlust (durch Verdunstung), ohne dass es zu Gewebespannungen kommt. Leichtbauweise und doch Stabilität zeigen uns die riesigen Schwimmblätter der Victoria-Seerose auf. Mehr Sicherheit bei einer Havarie eines Schiffes durch eine möglichst hohe Anzahl dicht verschlossener Schotten können Techniker von schwimmenden Samen lernen. Mehr Sicherheit beim Hausbau in Erdbebengebieten lernen Architekten von Bäumen mit Brettwurzeln und von Grashalmen. Tarnungen zum Schutz oder Angriff reichen bei Insekten und Spinnen bis zur höchsten Perfektion. Selbst Blumen täuschen und betrügen durch raffinierte (= intelligente) Angepasstheiten an bestimmte Verhaltensmuster von Insekten zum Zwecke der Bestäubung. Fazit: Evolution ist intelligent, kennt aber keine Ethik!

1 Vorbemerkungen

Intelligenz ist, auf den Menschen bezogen, ein Konglomerat an das Zentralnervensystem gebundener Faktoren: Beobachtungsvermögen, Weitergabe von Wahrgenommenem unter Berücksichtigung einer möglichst sauberen (nicht manipulierten) Sprache, Verarbeitung und Einordnung von Sinneswahrnehmungen, Lernfähigkeit, Fähigkeit zur Logik, Plausibilität und Vernunft, Beherrschung von Emotionen, Kreativitätsvermögen, Empathie und vieles andere mehr. Beim adjektivischen Gebrauch des Intelligenzbegriffes (wie im Titel dieses Beitrags) ist Vorsicht geboten; es lauert die „Gefahr“ einer unseriösen Vorgehensweise, die beispielsweise von der „Intelligent-Design“-Bewegung in den USA offeriert wird. Diese versucht lediglich mit einem pseudowissenschaftlichen Mäntelchen vom einfältigen Kreationismus abzulenken. Während der Kreationismus von einer Schöpfung der Welt durch den biblischen Gott vor einigen Tausend Jahren ausgeht, erkennt die „Lehre“ des „Intelligent-Design“ die Dauer der Entstehung der Organismen über viele Millionen von Jahren hinweg an, geht aber weiterhin davon aus, dass alle Lebewesen – auch die ausgestorbenen – direkte! Schöpfungen des Designers sind. Man möge es den Autoren des vorliegenden Artikels nachsehen, wenn sie – bei aller Toleranz – sich von einer solchen unglaublich mythischen Fantasie distanzieren. Jegliche ins Esoterische mündende Fantasien, wie etwa auch die angeblich fürsorgliche Kommunikation zwischen pflanzlichen Artgenossen, gehören natürlich nicht hier her.

Tatsächlich finden sich überall im Pflanzen- wie im Tierreich optimal funktionierende Konstruktionen. Sie sind letztlich das Ergebnis der Organismischen Evolution, namentlich der Selektion, beherrscht vom Ökonomischen Prinzip (= Optimierungsprinzip), vor dessen Hintergrund gnadenlose Konkurrenz stattfindet (Leins & Erbar 2008, 2018, Erbar & Leins 2018). Das „Säugetier“ *Homo sapiens* hat mit seiner Intelligenz, auf einer hoch komplexen Gehirnstruktur basierend, die ebenfalls aus der Organismischen Evolution hervorgegangen ist, optimal oder fast optimal funktionierende Geräte und Systeme geschaffen. Dies geschah entweder nach dem „Versuch und Irrtum“-Prinzip auf der Grundlage der Kreativität und unter Hinzuziehung von Logik oder zumindest Plausibilität. Dabei zeigt sich vielfach, dass menschliche Kreationen sich irgendwo in der „Natur“ z. B. bei Pflanzen oder Tieren wiederfinden. Oder anders herum: Naturobjekte dienen für die Konstruktion von Werkzeugen, Geräten und Systemen als Vorbilder.

Es wird in diesem Zusammenhang oft das Universalgenie Leonardo da Vinci als diesbezüglichen Pionier angeführt. Im Jahre 1505 hat er in seinem Manuscript „Über den Vogelflug“ („Sul volo degli uccelli“¹) eine Analyse der Flügel von Vögeln vorgestellt, um daraus ein künstliches Fluggerät zu konstruieren. Aber erst im 20. Jahrhundert begann der eigentliche Aufschwung in der Zusammenführung der Biologie und der Technik. Es entstand eine neue Wissenschaftsdisziplin, die BIONIK (= BIOlogie und TechNIK). Heutzutage befasst sich die Bionik in großem Umfang mit allen nur denkbaren Techniken, die von der Architektur, hochkomplexen Gerätschaften z. B. für die Medizin bis hin zur Robotik (= Robotertechnik) und künstlichen Intelligenz reichen.

Der erste, der sich in Deutschland in eindrucksvoller Weise umfänglich mit der Frage „Was kann die Technik von der Biologie lernen?“ auseinandergesetzt hat, ist der Zoologe Werner Nachtigall (z. B. Nachtigall 1997, 2007, 2008, Nachtigall & Blüchel 2000).

Eine hohe Popularität erlangte als Produkt der Bionik die von dem Botaniker Wilhelm Barthlott entdeckte Selbstreinigung bei Pflanzen, die auf dem sog. „Lotus-Effekt“ beruht. Schmutzteilchen werden an stark hydrophoben Oberflächen, wie sie beispielsweise die Blätter der Lotosblume (oder Lotusblume, *Nelumbo*

¹ Die Manuskriptblätter liegen als Teil des „Codice sul volo degli uccelli“, auch als „Codex Turin“ bekannt, in der „Biblioteca Reale“ in Turin (Italien).

nucifera) besitzen, einfach durch abperlendes Wasser entfernt (Barthlott & Ehler 1977, Barthlott & Neinhuis 1997).

Das Vorhaben biologische Eigenschaften direkt auf technische Konstruktionen bzw. Systeme zu übertragen, also eine „Eins-zu-eins-Kopie“ herzustellen, erfüllt in vielen Fällen nicht den erwünschten Erfolg. Beim bekannten „Lotus-Effekt“ sind wachsartige Mikro- und Nanostrukturen verantwortlich, die jedoch mechanischen Ansprüchen keineswegs gewachsen sind; also müssen jene aus stabileren Materialien nachgebildet werden (resultierende Produkte sind z. B. Kunststoffe, bestimmte Lacke, Fassadenfarben an Hauswänden). Neben chemischen Eigenschaften können auch Dimensionen bzw. Größenverhältnisse bei Direktkopien erfolgsmindernd sein. Ebenso muss das Nutzen-Kosten-Verhältnis stimmen und außerdem auf Gestalt- und Funktionskompromisse vor allem in komplexen Systemen eingegangen werden. Es ist also seitens des Konstrukteurs eine intelligente Vorgehensweise gefragt. Wie dem auch sei, in den nachfolgenden Abschnitten werden einige wenige, aber doch einfach nachzuvollziehende Beispiele aus der unüberschaubaren Fülle optimaler oder – bei Kompromissen – suboptimaler Problemlösungen bei Pflanzen und Tieren vorgestellt und zwar unabhängig davon, ob diese als Vorbilder technischer Errungenschaften dienten oder in den menschlichen Konstruktionen lediglich ihre Parallele finden.

2 Optimierung als evolutives Ziel

Eine Höherentwicklung von Organismen wird von einem Prinzip gesteuert, dem ökonomischen Prinzip oder Optimierungsprinzip, das die Selektion bestimmt. Dieses Prinzip wird dann wirksam, wenn Organismen (Individuen in einer Population oder verschiedene Arten) in ihrem unterschiedlichen Angepasstsein an bestimmte Umweltfaktoren (abiotischer und biotischer Art) in Konkurrenz treten („survival of the fittest“, „struggle for life“, Darwin 1859). Voraussetzung ist natürlich ihre Unterschiedlichkeit in der genetischen Ausstattung, die auf rein zufällige (!) Mutationen und Rekombinationen zurückzuführen ist; ebenfalls zufällig vollziehen sich Migrationen und Isolierungen (Bildung neuer Sippen). „Konkurrenzkämpfe“ spielen sich vielfach auf Balzplätzen und Brutplätzen ab. In Abb. 1 sind einige Szenen aus dem wehrhaft-turbulenten Sexualverhalten bei der sizilianischen Mörtelbiene *Chalicodoma sicula* herausgegriffen. Das Weibchen „entscheidet“ über den Zeitpunkt der Begattung und begibt sich auf einen Paarungsplatz (mating place) – eine



Abbildung 1: Drei Männchen (1, 2, 3) und ein Weibchen (♀) der Sizilianischen Mörtelbiene (*Chalicotoma sicula*) in vier Szenen auf einem Paarungsplatz. Erklärung siehe Text. Bildquellen: Eigene Aufnahmen.

etwa ein oder wenige m^2 große Fläche, auf der einige Mörtelbienen-Männchen unterschiedlicher Größe und Färbung (dunkelbraun bis grau), auf Weibchen wartend, patrouillieren. In Abb. 1a hat sich bereits ein Männchen – mit 1 nummeriert – auf einem Weibchen niedergelassen und ist gerade im Begriff zu kopulieren, was sich in einem raschen Fächeln seiner Flügel zur Luftzufuhr bemerkbar macht. Die weiblichen Tiere sind größer als die unter sich unterschiedlich großen männlichen und besitzen blau-schillernde Flügel und mächtige Mandibeln (zu erkennen in Abb. 1c).² Es dauert nicht lange bis sich Konkurrenz einstellt – in unserem Beispiel mit zwei weiteren Männchen (mit 2 und 3 in Abb. 1a nummeriert); diese rücken

² Die Weibchen übernehmen die gesamte Brutfürsorge: Sammeln von Pollen und Nektar, Eintrag der Brutnahrung in einen von ihr selbst hergestellten Becher aus „Mörtel“ (in Bandkeramik-Manier) und Verschluss des zylinderförmigen Bechers nach der Ablage eines einzigen Eies. Oft werden mehrere solche „Brutzyylinder“ nebeneinander gebaut und zuletzt mit zusätzlichen Mörtelschichten zu einer Einheit „verputzt“.

auf (Abb. 1b) und es kommt blitzschnell zu einem Kampfgetümmel. Ein kurzer Ausschnitt des Getümmels ist in Abb. 1c wiedergegeben, auf dem das Weibchen mit den kräftigen Mandibeln zu sehen ist; Männchen Nr. 1 ist in diesem „Drunter und Drüber“ nicht auszumachen, geht aber bei diesem Kampf als Sieger hervor, wie aus einem Vergleich des etwas ausgefransten linken Flügels und dem weißen „Gesichtsbart“ in Abb. 1b und 1d hervorgeht. Es können nun weitere Kämpfe folgen, bis schließlich das kräftige Weibchen in katapultartiger Weise eines der Männchen wegstoßt, den Paarungsplatz verlässt und ihrer Brutarbeit nachgeht (zuerst aber sich am Nektar einer Blüte stärkt und dabei eventuell von kleineren „Verlierern“ belästigt wird).

Die „Kampfarenen“ bei den Blütenpflanzen, die wie alle Landpflanzen und viele Algen einen heterophasischen Generationswechsel durchlaufen, sind Narbe und Griffel einerseits sowie die Keimplätze der Samen andererseits. In der Haplophase kommt es zur Pollenschlauchkonkurrenz, in der Diplophase zur Keimlingskonkurrenz (siehe etwa Leins & Erbar 2008, 2010, 2018); die Sieger sind beispielsweise diejenigen Konkurrenten die (genetisch bedingt) durch einen schnelleren Stoffwechsel bzw. ein schnelleres Wachstum ausgezeichnet sind.

Im Folgenden werden nun einige besonders zweckmäßige Systeme in unterschiedlichen Ausgestaltungen aufgeführt, beginnend mit alltäglichen Gerätschaften und endend mit raffinierten „Überrumpelungstricks“, die teilweise auch das menschliche Dasein im Alltag bestimmen.

2.1 Streuer

Vielfach wird der Botaniker und Naturphilosoph Raoul Heinrich Francé als Vater der Bionik gesehen. Das deutsche Patent, das er 1920 für einen Streuer, den er nach dem Vorbild einer Mohnkapsel konstruiert hatte, war das erste Patent für eine bionische Erfindung (Abb. 2; siehe Francé 1920, Henkel 1997). Der Streuer sollte eine gleichmäßige Verteilung des Streuguts, z. B. Samenkörner, ermöglichen. Eine gleichmäßige Verteilung setzt natürlich eine entsprechende Handhabung voraus. Der Zweck einer natürlichen Streukapsel wie bei den Mohnen und anderen Gewächsen besteht nach neueren Untersuchungen aber gerade nicht in einer gleichmäßigen Verteilung der Samen bzw. der sich daraus entwickelnden Keimlinge, sondern folgt den Anforderungen eines verstärkten innerartlichen Konkurrenzkampfes, resultierend aus der Anhäufung der Samen in der Nähe der Mutterpflanze (Abb. 3; z. B. Leins & Erbar. 2008, 2010, Erbar & Leins 2018).

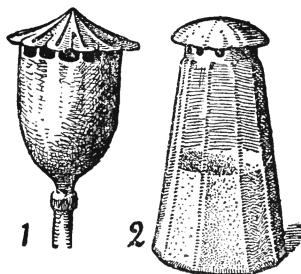
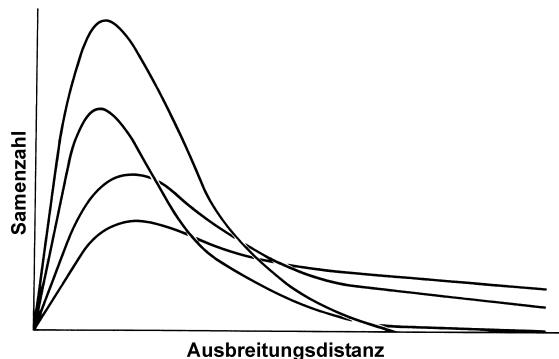


Abb. 1. Eine biotechnische „Erfinbung“ und ihr Vorbild.
Der neue Streuer für Haushalt und mediz. Zwecke RGM. Nr. 723730 (2) und ein reifer Mohnkopf (1), der seinen Inhalt ebenso organisch ausstreut.

Abbildung 2: Erstes bionisches (biotechnisches) Patent für einen Streuer von Raoul Heinrich Francé. Nachdem ein gleichmäßiges Ausbringen von Streugut mit mehreren Modellen nicht erfolgreich war („Ein gewöhnliches Salzfaß, wie es auf jedem Wirtstische steht. Einen Puderstreuer . . . , einen Zerstäuber . . .“), nahm Francé die Mohnkapsel als Vorbild. Aus Francé 1920.

Zum Zustandekommen dieser Anhäufung wollen wir aus der Fülle von verschiedenen Formen von Porenkapseln bei den Mohnen (Abb. 4), zwei miteinander im Windkanalexperiment (Abb. 5) und durch Freilandbeobachtungen vergleichen, nämlich die Kapseln von Klatsch- und Sand-Mohn (*Papaver rhoeas* und *Papaver argemone* ssp. *argemone*). Der Klatsch-Mohn hat breite und großporige, der Sand-Mohn schmale und kleinpore Kapseln. Es ist geradezu zu fordern, dass breite



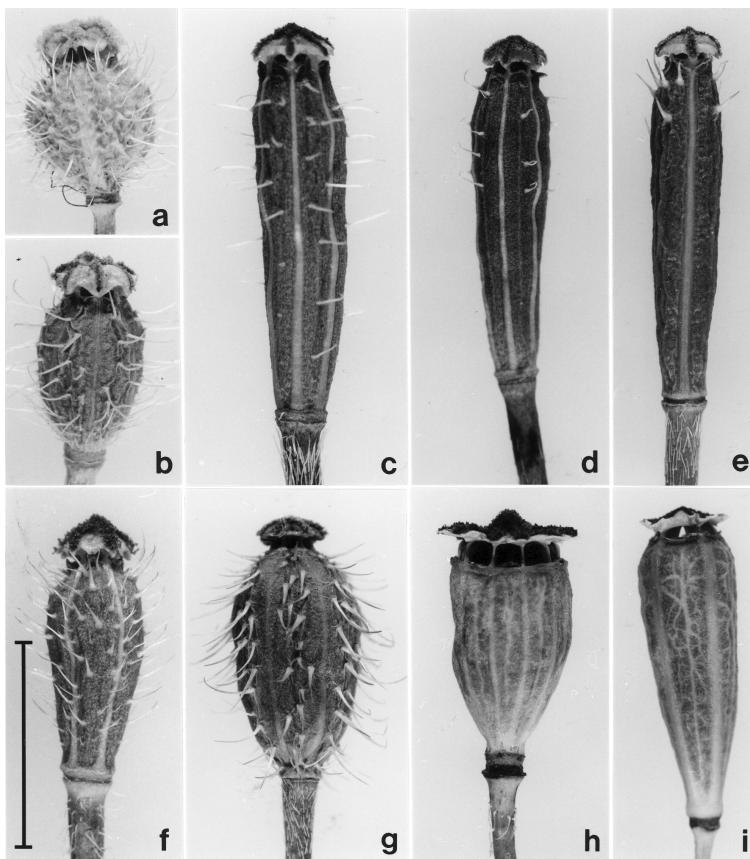


Abbildung 4: Verschiedene Kapselformen von Mohnen. – a, *Papaver pavoninum*. – b, *Papaver apulum*. – c, *Papaver argemone* ssp. *minus*. – d, Sand-Mohn *Papaver argemone* ssp. *argemone*. – e, *Papaver argemone* ssp. *meiklei*. – f, *Papaver argemone* ssp. *nigrotinctum*. – g, Bastard-Mohn *Papaver hybridum*. – h, Klatsch-Mohn *Papaver rhoes*. – i, Saat-Mohn *Papaver dubium*. Der Messbalken entspricht 1 cm. Aus Kadereit & Leins 1988 bzw. Leins & Erbar 2008.

und kurze Kapseln mit relativ großen Poren bei gleichen Windbedingungen mehr Samen pro Zeiteinheit entlassen als lange und schmale Kapseln mit relativ kleinen bzw. durch Porenzähne zweigeteilten Poren.

Die beiden Graphiken der Abb. 5 veranschaulichen das erwartete unterschiedliche Verhalten. Im Windkanalexperiment haben beim Klatsch-Mohn bereits nach 25 Böen bei einer Windgeschwindigkeit von 12 m/s mehr als 70% der Samen die

Kapsel verlassen. Beim Sand-Mohn sind es nur etwas über 30%. Nach weiteren 25 Böen verbleiben beim Klatsch-Mohn nur noch etwa 10% der Samen in der Kapsel, von denen unter den gegebenen Versuchsbedingungen durch weitere Böen kaum mehr welche ausgestreut werden. Dagegen liegt beim Sand-Mohn das Versuchsende erst nach etwa 175 Böen. Es befinden sich dann noch etwa die Hälfte der Samen in der Kapsel. Man kann daraus den Schluss ziehen, dass weitere Samen erst bei höheren Windgeschwindigkeiten die Kapsel verlassen und dann vom Wind ergriffen natürlich weiter fliegen. Damit würden sich bei den genannten Beispielen Unterschiede im räumlichen Verteilungsmuster der Samen ergeben. Nun lässt sich aber im Freilandexperiment beim Sand-Mohn beobachten, dass die in der

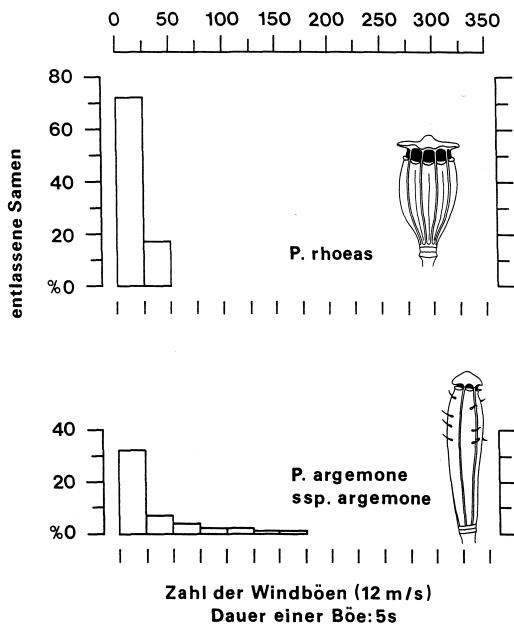


Abbildung 5: Vergleich des zeitlichen Ablaufs der Samenfreisetzung aus den Porenkapseln von Klatsch-Mohn (*Papaver rhoeas*) und Sand-Mohn (*Papaver argemone* ssp. *argemone*) in Windkanal-experimenten. Die gestielten Kapseln wurden so lange kurzen (5 s) Windböen ausgesetzt, bis bei einer Windgeschwindigkeit von 12 m/s keine Samen mehr entlassen wurden. Aus Kadereit & Leins 1988, verändert, bzw. Leins & Erbar 2008.

Kapsel verbleibenden Restsamen durch spätere, allmähliche Kapselverrottung (Abb. 6) freigesetzt und unweit von der Mutterpflanze deponiert werden können. Das letztlich resultierende Ausbreitungsmuster mag sich dann nur wenig von dem des Klatsch-Mohns unterscheiden.

Was den unterschiedlichen zeitlichen Ablauf der Samenausstreuung betrifft, so mag die rasche Entleerung der breiten großporigen Kapseln vom Klatsch-Mohn darin eine Erklärung finden, dass ein Großteil der Samen dem Zugriff Körner fressender Vögel entgeht, die die Kapseln mit ihrem Schnabel leicht zu öffnen imstande sind. Interessanterweise ist beim Sand-Mohn die viel langsamere Samenfreisetzung (in kleinen Portionen) kombiniert mit robusteren Kapseln, die nicht so leicht aufzubrechen sind. Außerdem können, nämlich bei einer Unterart des Sand-Mohns (*Papaver argemone* ssp. *nigrotinctum*), steife Borsten auf der Kapseloberfläche zusätzlich als Stoßdämpfer wirken (steif beborstete Kapseln kommen noch in anderen Mohn-Sippen vor, Abb. 4).

Eine mehr punktförmige Besetzung einer Konkurrenz-„Arena“ wie etwa eine kleine Narbe oberhalb eines Fruchtknotens mit Hilfe von Streueinrichtungen bei der Übertragung von Pollenkörnern zunächst auf bestäubende Insekten finden wir beispielsweise in Blüten mancher Raublattgewächse (Boraginaceae). Beeindruckend in seiner Präzision ist der sog. Streukegel etwa beim Borretsch (*Borago officinalis*, Abb. 7b). Grob vergleichbar ist dieser Streukegel mit einem Salzstreuer, wie man sich ihn fürs Frühstücksei wünscht (Abb. 7a). Die Wandung des Pollenbehälters wird von den fünf langen, zur Spitze hin allmählich sich verschmälernden



Abbildung 6: Von links nach rechts: allmähliche Kapselverrottung beim Sand-Mohn *Papaver argemone* ssp. *argemone*. Aus Blattner & Kadereit 1991 bzw. Leins & Erbar 2008.

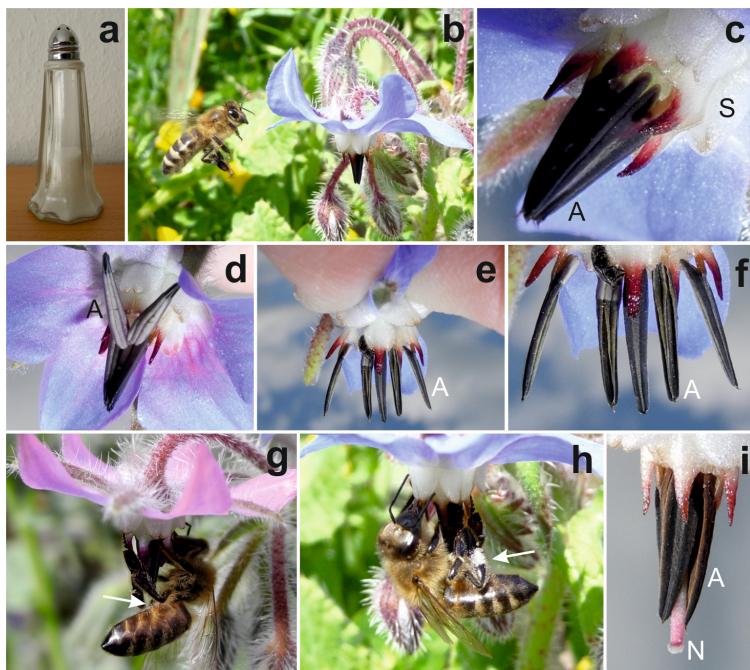


Abbildung 7: Ein wünschenswerter Salzstreuer für das Frühstücksei (a) findet eine Parallele im Pollen-Streukegel der Boretsch-Blüte (*Borago officinalis*; b–i). A = Anthere (Staubbeutel), N = Narbe, S = Schlundschuppe, der Pfeil in g weist auf der Bauchseite der Biene auf herausgerissene Pollenkörpern, der Pfeil in h zeigt auf weiße Pollenkörpern am Hinterbein der Biene; weitere Erklärungen siehe Text. Bildquellen: Eigene Aufnahmen.

Staubbeuteln (Antheren), die dicht beisammenstehen, gebildet (Abb. 7c). Die Antheren öffnen sich nach innen von ihren Spitzen her, wie man an den beiden in Abb. 7d nach außen geklappten erkennen kann. In den beiden Abb. 7e–f ist die Blüte an ihrer Basis zwischen Daumen und Zeigefinger gequetscht, so dass alle fünf Antheren zum Spreizen gebracht werden. Die Antheren sind bereits schon leer, und ihre beiden schlitzartigen Öffnungen reichen in diesem Stadium bis zur Basis. Im Gesamten bilden die umgebogenen, die Schlitze umgebenden Wandpartien im Innern des Streuapparates zusätzliche Gleitschienen, entlang derer die Pollenkörner zur Spitze des Kegels befördert werden. Pollenkörner treten erst heraus, wenn der Streukegel zum Schütteln gebracht wird. Dies besorgen meist Honigbienen (*Apis mellifera*), die sich beim Blütenbesuch, um an den Nektar, der

sich am Blütengrund befindet, mit ihren Mundwerkzeugen zu gelangen, immer auf die gleiche Weise verhalten. Es sind mehrere funktionsgekoppelte Eigenschaften, die zusammen einen optimalen Bestäubungsverlauf garantieren; in der Blütenökologie spricht man von einem Bestäubungssyndrom. Zu diesem gehört beim Borretsch die Hängeposition der Blüte, die den Pollenstreuer in die funktionsbereite Lage versetzt; die Öffnung des Streukegels ist nach unten gerichtet. Die Biene hält sich – an der Blüte hängend – am Grunde des Streukegels fest und berührt dort sog. Schlundschuppen – das sind zur Blütenmitte hin gerichtete Ausstülpungen, die bei den Raublattgewächsen nicht selten zu finden sind – sowie auf Lücke zu diesen stehende pfriemliche Anhängsel der sehr kurzen Staubgefäßfilamente. Die Berührung dieser Anhangsorgane sowie das Einführen des Rüssels zwischen den Staubgefäßeln löst ein Rütteln des Pollenstreuers aus, und Blütenstaub rieselt ziemlich genau auf die Bauchseite des Abdomens der an der Blüte hängenden Biene (Pfeil in Abb. 7g). Bei mehrmaligem Anflug der Blüten kann es zudem zum Pollenhöseln seitens der Biene kommen (Abb. 7h; Pfeil zeigt auf weiße Pollenkörner am Hinterbein der Biene). Hat sich der Streukegel entleert, beginnt der Griffel mit der reifenden Narbe, dem Landeplatz der Pollenkörner, sich zu strecken, bis die Narbe aus der Streukegelöffnung herausschaut (Abb. 7i). Das gleiche Verhalten der Insekten an den jetzt in der weiblichen Phase befindlichen Blüten garantiert damit eine exakte Berührung der Narbe mit der Körperstelle des Bestäubers, an der sich die Pollenlieferung befindet. Die Vormännlichkeit (Proterandrie) ist ebenfalls Bestandteil des betreffenden Blumensyndroms.

2.2 Anheftungsverfahren: Saugnäpfe, Klebeflächen, Klettverschlüsse

Erinnern wir uns an die „Magdeburger Halbkugeln“, eine der eindrucksvollsten Geschichten aus dem 17. Jahrhundert. Damit hat der Ingenieur und Physiker Otto von Guericke in einem spektakulären Experiment (entgegengesetzt ziehende Pferdegespanne konnten zwei Hälften einer Kugel, in welcher er ein Vakuum erzeugte, nicht mehr voneinander trennen) nachgewiesen, dass die Luft auf einen im Vakuum befindlichen Hohlraum einen Druck ausübt. Nach diesem Prinzip funktionieren auch die Saugnäpfe bei den Tintenfischen (Abb. 8a). In der Technik macht man es sich mit den Vakuumhaken aus Plastik - im Haushalt vielfach verwendet – zunutze (Abb. 8b–c). Die Haftfähigkeit auf möglichst glatten und sauberen Wandflächen hängt vom Durchmesser der Haftscheibe ab.

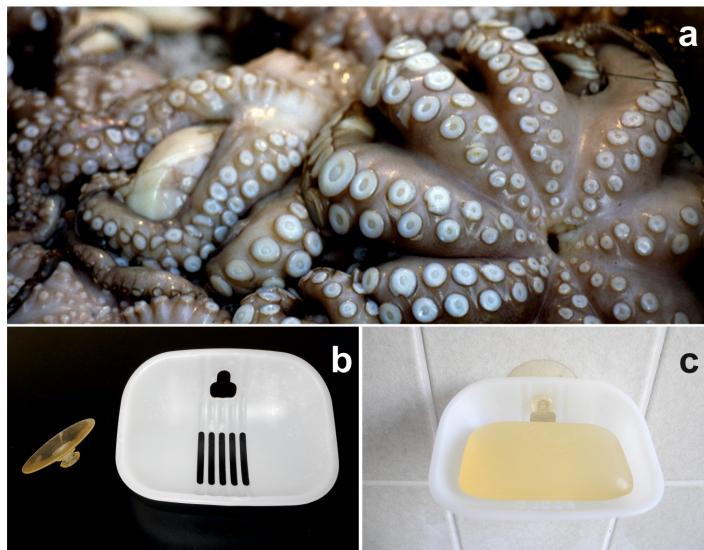


Abbildung 8: Natürliche und technische Saugnäpfe. Bildquellen: Eigene Aufnahmen.

Eine deutlich bessere Haftfähigkeit haben die Grundflächen der Haken durch die Aufbringung von Leim. Ihr Nachteil ist jedoch, dass diese schwerlich auswechselbar sind. Wenn wir einen Vergleich mit einer in der Natur vorkommenden Klebscheibe anstellen wollen, können wir den Wilden Wein (*Parthenocissus*³) heranziehen. Dieses z. B. an Hausfassaden (Abb 9a–b) zu findende Rebengewächs (Vitaceae) bildet an den Achsenenden verzweigter „Ranken“ kleine Haftscheiben (Abb. 9c–e), deren Innenseite, also einer Unterlage z. B. einer Hauswand anliegenden Seite, verschleimt und bei der Austrocknung die Haftscheibe mit der Unterlage verklebt. Je rauer die Unterlage – z. B. der Putz auf einer Hausfassade – ist, um so fester ist die Scheibe mit ihr verbunden; die verschleimenden Zellen können nämlich in feine Klüfte hineinwachsen, was bereits Ende des 19. Jahrhunderts einer Doktorarbeit zu entnehmen ist (von Lengerken 1885a; neuere Arbeiten

³ Wie es uns scheint, sind die drei in Mitteleuropa angepflanzten Arten *Parthenocissus tricuspidata* (Heimat: O-Asien), *P. quinquefolia* (Heimat: N-Amerika) und *P. inserta* (Heimat: N-Amerika) nicht klar voneinander zu trennen (wahrscheinlich Kulturvarietäten).

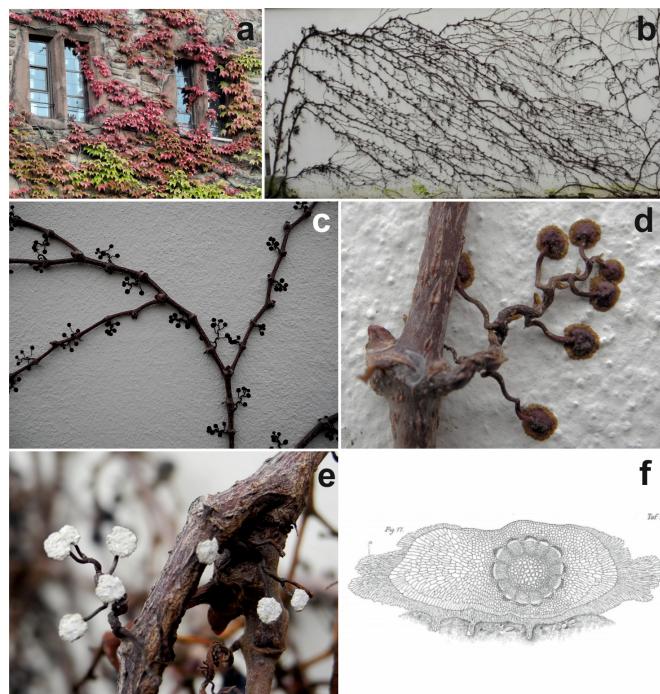


Abbildung 9: Wilder Wein *Parthenocissus*, ein kletterndes Holzgewächs, das sich mittels Haftscheiben an Hauswänden festhält. – a, Beginnende Rotfärbung des Laubs an der Handschuhsheimer Tiefburg (Heidelberg). – b, Laubfreies „Klettergerüst“ an einer verputzten rauen Wandfläche. – c–d, Klebscheiben an den Zweigenden kleiner Sprosse, die das „Gerüst“ fest mit der Unterlage verbinden. – e, Haftscheiben von der Unterlage entfernt mit Verputzresten. – f, Querschnitt einer Haftscheibe von *Ampelopsis muralis* (Synonym für *Parthenocissus quinquefolia*) mit einem kleinen Stück der Unterlage; Fig. 17 aus von Lengerken 1885b (a: bezeichnet die Epidermis des „Haftballen“, die an der Kontaktstelle zur Unterlage durch vielfache Teilungen wuchert). Bildquellen a–e: Eigene Aufnahmen.

gehen von einem Sekret⁴ aus, das ausgeschieden wird, z. B. Steinbrecher et al. 2011). Das kann beim Entfernen des Kletterstrauches zu Problemen führen. Noch

⁴ Es liegen erste Ergebnisse vor, dass es sich um einen Verbundklebstoff aus Polysacchariden, Kallose und schleimartigen Pektinen handelt (Bowling & Vaughn 2008).

mehr Probleme jedoch bereitet beim Entfernen ein anderer Kletterstrauch, der Efeu (Abb. 10a–c).

Der Efeu (*Hedera helix*) aus der Familie der Efeugewächse (Araliaceae) ist der einzige bei uns heimische Wurzelkletterer. Wurzelkletterer können ihren Sprossen entlang Haftwurzeln ausbilden, mit denen sie sich fest an Bäumen oder Felsen anheften (Abb. 10d–f). Die Wurzeln dringen dabei nicht bis in die Leitungsbahnen der Stämme und Äste ein (der Efeu ist also kein Schmarotzer!). Wie schafft

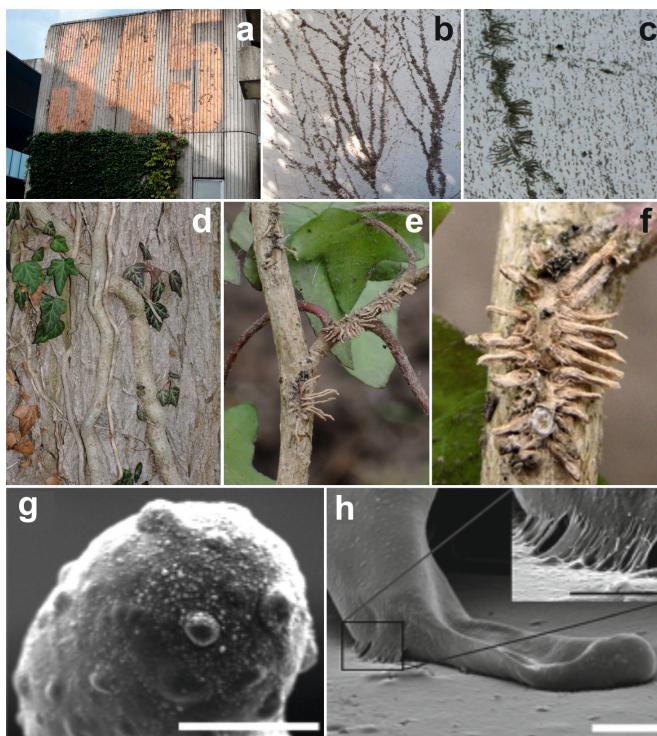


Abbildung 10: Efeu *Hedera helix*. – a–c, Haftwurzelreste nach Entfernung der Pflanze von einer Betonwand im Theoretikum der Universität Heidelberg. – d, Efeupflanze klettert einen Baum hoch. – e–f, Sprossbürtige Haftwurzeln der Efeupflanzen. – g–h, Rasterelektronenmikroskopische Bilder von Wurzelhäärchen; aus Melzer et al. 2010. – g, Spitze eines Wurzelhäärchens mit kugeligen Bläschen, die bei Berührung aufplatzen und eine sofort aushärtende Flüssigkeit abgeben. – h, Wurzelhäärchen in Kontakt mit einer Polyester-Folie (Mylar-Folie). Das Inlay-Bild zeigt Kleberfäden, die das Wurzelhäärchen an dem Substrat festkleben. Bildquellen a–f: Eigene Aufnahmen.

der Efeu es aber, sogar senkrechte Wände hochzuklettern ohne abzurutschen? Verantwortlich für ein dauerhaftes Festhalten sind beim Efeu die Wurzelhaare. Diese befinden sich hinter der Wurzelspitze und dienen gewöhnlich der Aufnahme von Wasser und gelösten Mineralsalzen. Beim Efeu aber hat ein Funktionswandel stattgefunden.

Auf der Oberfläche der kleinen, einzelligen Wurzelhäärchen (sie haben einen Durchmesser von 10–15 Mikrometer und eine Länge von 20–400 Mikrometer) sitzen Bläschen, die eine klebrige Flüssigkeit enthalten (Abb. 10g). Bei einer Berührung mit einer Baumrinde oder einer Hauswand platzen diese auf, und die Flüssigkeit härtet sofort aus (Abb. 10h). Da dieser Prozess sehr schnell abläuft, konnte die chemische Zusammensetzung der Flüssigkeit noch nicht aufgeklärt werden. Aber ein weiterer Aspekt des Festhaltens konnte nachvollzogen werden. Wenn das Wurzelhaar in einer noch so kleinen Vertiefung der Baumrinde oder Hauswand austrocknet, verdrillt es sich bei diesem Prozess und wird dadurch kürzer. Die Verdrillung beruht auf dünnen Cellulose-Fasern (sog. Mikrofibrillen), die in der Zellwand parallel zueinander, aber spiraling gewunden verlaufen. Sie stehen in einem Winkel von ca. 40° zur Längsachse. Da aber an der Spitze des Häärchens der Winkel größer ist (er beträgt ca. 55°), krümmt sich die Haarspitze löffel- oder hakenartig, was zusätzlichen Halt im Inneren der Oberflächenvertiefung bietet. Außerdem wird durch die Verkürzung des Häärchens der ganze Efeutrieb näher an die Baumrinde oder Hauswand gezogen. All diese faszinierenden, insgesamt intelligenten Befunde sind den subtilen Untersuchungen von B. Melzer, T. Steinbrecher, R. Seidel, O. Kraft, R. Schwaiger und T. Speck (2010; Universität Freiburg und Karlsruher Institut für Technologie – KIT) zu verdanken (siehe auch Speck 2011). Jetzt wundert es nicht mehr, dass sich die Efeupflanze meist nicht ohne Schäden im Putz von einer Hauswand entfernen lässt. Auf absolut glatten Flächen wie Glas oder Aluminium funktioniert das Efeu-Prinzip nicht. Aber mit Oberflächen, die zumindest mikroskopisch kleine Risse oder Vertiefungen aufweisen, stellen die Efeu-Haftwurzeln durch ihr spezielles Ankleb- und Einhak-Haftsystem eine optimale, dauerhafte Verbindung her.

Anheften – Lösen – Anheften – Lösen oder Schließen – Öffnen – Schließen – Öffnen: Der Klettverschluss! Er gehört zu den oft zitierten Errungenschaften der Bionik. Dieses Bionik-Produkt hat einen wahren Siegeszug erlebt und ist beispielsweise in der Modeindustrie nicht mehr wegzudenken. Erfunden wurde der Klettverschluss von dem Schweizer Ingenieur George de Mestral, der die-

sen 1951 patentieren ließ. Vorbild seiner Erfindung war der kompakte Blüten- bzw. Fruchtstand eines Köpfchenblütlers (Compositae = Asteraceae), nämlich die Klette (*Arctium*, z. B. *Arctium lappa*; Abb. 11a–b). Die Klettfruchtstände sind, wie bei den Köpfchenblütlern üblich, von einer Hülle aus Hochblättern umgeben. Bei der Mariendistel (*Silybum marianum*) sind diese voluminös und bizarr, beim Gänseblümchen (*Bellis perennis*) schmal und wenig auffallend, bei der Artischocke (*Cynara cardunculus*) genießen wir in einen Dip getunkt ihren fleischigen basalen Teil. Bei *Arctium* sind die Hochblätter lang und schmal und in großer Zahl vorhanden und am Ende in ein feines Häkchen übergehend (Abb. 11a–b). An vorbeistreifenden Haartieren (z. B. Hasen oder Rehe) bleiben die Kletten hängen



Abbildung 11: Klettverschluss-Vorbild und Nachahmung. – a – b, Blüten- und Fruchtstände von der Großen Klette *Arctium lappa*. – c, Schuh mit Klettverschluss. H = Hakenschicht, Ö = Ösenschicht (feine Fäden). – d, Haken. – e, Gewellte Fäden. – f, Verschluss beider Schichten im Schnitt. Bildquellen: Eigene Aufnahmen.

und werden entweder abgerissen und von den Tieren abtransportiert⁵, oder die Tiere lösen, falls sich die Kletten dabei nicht von der Pflanzen losreißen lassen, einen Katapult-Effekt aus, so dass die einzelnen Früchte aus dem Fruchtstand bzw. den Fruchtständen heraus geschleudert werden. Die Kletten dienen also als Diaspore⁶ 1. Ordnung zur Ausbreitung der Früchte (Nussfrüchte), die man als Diasporen 2. Ordnung bezeichnen kann. Bezogen auf das Bionik-Produkt erfordern die Anheftung und das Entfernen von Gegenständen elastische, aber doch relativ stabile Haken auf der einen Oberfläche und gewellte, dünne Haare auf der anderen, welch letztere quasi als Ösen fungieren (Abb. 11d–f).

2.3 Kratzfeste Oberflächen

Hier geht es um Oberflächen, die bei mechanischer Beanspruchung etwa durch scharfe Teilchen wie Sand oder schmiegende Objekte keine Schrammen bekommen. Um verschiedene Möglichkeiten einer Lösung des Problems bei Pflanzen kennenzulernen, begeben wir uns etwa in Dünenregionen von Meeresküsten. Dort ist durch den häufig wehenden Wind mit Sandgebläsen zu rechnen. In der Technik wären geeignete Lösungen beispielsweise mit einem gehärteten Stahl mit glatter Oberfläche oder mit bestimmten Lacken zu erreichen. Bei den Pflanzen muss genügen, dass eine glatte Oberfläche einer von der Epidermis nach außen abgeschiedene sog. Cuticula⁷ von gewisser Härte und Dicke ausgebildet ist. Die Blätter der auf diese Weise geschützten Pflanze fühlen sich hart und lederartig zäh an; eindrückliche Beispiele finden sich etwa beim Strand-Mannstreu *Eryngium maritimum* (Apiaceae, Abb. 12a–b) und bei der Strand-Zaunwinde *Calystegia soldanella* (Convolvulaceae, Abb. 12c).

Etwas außergewöhnlich – aber im technischen Bereich durchaus häufig im Gebrauch – ist bei Pflanzen eine Abwehr von Schäden unter Zuhilfenahme des schädigenden Materials selbst, nämlich der Dachpappen-Effekt. Als Beispiel wäre das Dickblättrige Leimkraut *Silene succulenta*, ein Nelkengewächs (Cary-

⁵ Für de Mestral lieferten die Kletten im Fell seiner Hunde die Vorlage.

⁶ Der Begriff „Diaspore“ bezeichnet Ausbreitungs- oder Vermehrungseinheiten (siehe z. B. Erbar & Leins 2018).

⁷ Hauptbestandteil der Cuticula ist das Cutin. Ähnlich wie das Suberin (Korksubstanz), das das Cutin in sekundären Abschlussgeweben, den Borken bei den Holzgewächsen, ersetzt, ist es ein lipophiles Mischpolymerisat. Es bildet die Matrix für eingelagerte Wachse in der Cuticula.

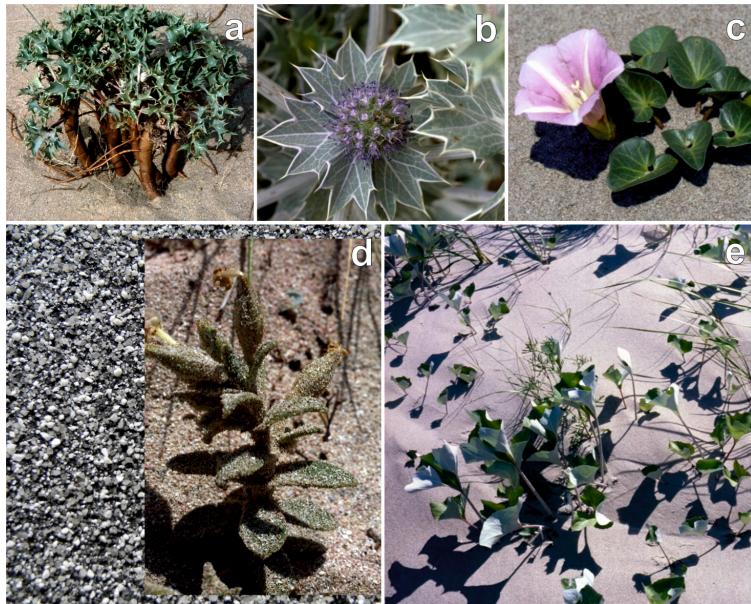


Abbildung 12 Blattoberflächen. – a–b, Strand-Mannstreu *Eryngium maritimum*. – c, Strand-Zaunwinde *Calystegia soldanella*. – d, Dickblättriges Leimkraut *Silene succulenta*; Bild auf Dachpappe montiert. – e, Dünen-Pestwurz *Petasites spurius*. Erklärungen siehe Text. Bildquellen: Eigene Aufnahmen.

ophyllaceae), zu nennen (Abb. 12d). Der vom Wind herangetragene Sand bleibt an der klebrigen Oberfläche der Pflanze hängen und bremst quasi die weiteren auftreffenden Sandkörner ab.⁸

Noch erstaunlicher ist die Strategie einer auf sandigen Flächen vorkommenden Pestwurz-Art, nämlich *Petasites spurius* (Asteraceae, Abb. 12e). Die Pestwurz-Arten sind durch relativ großflächige Blattspreiten gekennzeichnet. Im Umriss sind die Blätter der in Frage kommenden Dünen-Pestwurz (= Filzige Pestwurz) breit herzförmig mit verlängerten Seitenlappen, so dass die Blattspreite breiter als lang ist. Der relativ dünne und leicht bewegliche Blattstiel geht in einen breit

⁸ Wie die besandete Dachpappe schützt die Besandung aber auch vor der Sonneneinstrahlung; die Sandsplitter reflektieren die Sonnenstrahlen und verhindern auf diese Weise eine zu große Erhitzung an Sonnentagen.

dreieckigen Spreitengrund über. Die Oberseite der Blattspreite ist dunkelgrün, die Unterseite durch eine dicht filzige Behaarung (Haare tot und lufterfüllt) weiß. Bei Windstille ist die Blattspreite mehr oder weniger ausgebreitet und die Photosynthese ist voll im Gange. Kommt stärkerer Wind auf, bewirkt dieser, dass die leicht beweglichen Seitenlappen der Blattspreiten nach innen umschlagen und mit dem übrigen Teil zusammen eine Spitztütte bilden (Abb. 12e), die sich mit Hilfe des leicht beweglichen Blattstiels in die geeignete von der Windrichtung bestimmte Stellung begibt: Tüten spitze gegen Luv, Tütenöffnung gegen Lee. Dadurch prallt der Sand gegen den schützenden Haarfilz. Das Geniale dabei ist die nur vorübergehende getroffene Schutzmaßnahme (bei Windstille kann die Photosynthese wieder voll in Gang gesetzt werden). Man könnte sich nun über eine eventuelle technische Übertragung Gedanken machen. Dies soll aber an dieser Stelle lediglich eine Anregung sein.

2.4 Gewellte Flächen als Kälte- und Hitzeschutz: Der Seersucker-Effekt

Es gibt verschiedene Möglichkeiten der Überwinterung von Blütenpflanzen: Entweder – und dies ist bei den sog. Einjährigen der Fall – kommen sie lediglich mit Hilfe ihrer Samenproduktion über den Winter, oder sie überwintern zusätzlich mit unterirdischen Organen (Rhizome, Knollen, Rüben, Zwiebeln) oder als wintergrüne Rosettenpflanzen, bei denen der lufthaltige Schnee einen Kälteschutz bietet (dies gilt auch für direkt am Boden befindliche Ausläufer), oder aber es sind Holzgewächse, die ihre Blätter für gewöhnlich abwerfen und in ihren Blattachseln Überwinterungsknospen zurücklassen. Interessant sind, was den Kälteschutz der Blätter gegen einen gefrorenen Boden, also von unten her, anbelangt, manche Rosettenpflanzen. Eine in den Alpen und Pyrenäen vorkommende, im Gardasee-Gebiet sehr häufig auftretende Rosettenpflanze eines Lippenblüters (Lamiaceae), nämlich das Drachenmaul *Horminum pyrenaicum* (Abb. 13a), schützt ihre am Boden flach ausgebreiteten, insbesondere jungen Blätter durch Luftpölsterchen der gestalt, dass die Gewebe zwischen den Blattadern (die sog. Intercostalfelder) ein verstärktes Flächenwachstum erfahren und sich aufwölben. Ähnliches lässt sich übrigens auch beim Wirsing beobachten. Luft ist ein schlechter Wärmleiter und schützt unter der Blattunterseite das Blatt vor dem Erfrieren.

Das *Horminum*-Blatt lässt sich auch als Modell für eine bestimmte Krepp-Webart in der Mode oder auch in der Bettbezüge-Herstellung, allerdings mit der



Abbildung 13: Oberflächen. – a, Mitte der Blattrosette des Drachenmauls *Horminum pyrenaicum* (Lamiaceae) mit runzeligen Blättern. – b, Bettbezug in der Seersucker-Webweise (Krepp-Gewebe mit einem dreidimensionalen „zerknitterten“ Oberflächeneffekt). Bildquellen: Eigene Aufnahmen.

entgegengesetzten Wirkung, nämlich Wärmeschutz, heranziehen. Es ist das sog. Seersucker-Tuch (das Wort kommt aus dem Persischen und bedeutet so viel wie Milch und Zucker). Diese Stoffe eignen sich hervorragend für ein angenehmes Hautklima. Hemden aus dieser Webart (abwechselnd werden beim Webvorgang die längs verlaufenden Kettfäden mal lockerer, mal fester gespannt) tragen sich an heißen Sommertagen recht angenehm, da die Tuchfläche nicht wie bei einem glatten Hemd großflächig auf der Haut liegt, sondern nur, und oft ganz locker, punktuell mit der Haut in Berührung kommt. Bei den Bettbezügen (Abb. 13b), die summers wie winters einen angenehmen Schlaf ermöglichen, kommt noch ein weiterer nicht zu unterschätzender Vorteil hinzu: Die Seersucker-Bettwäsche darf nicht gebügelt werden; sie sieht auch im „Knitter-Look“ recht gut aus.

2.5 Mechanisch stabile Konstruktionen von größerem Format: Faltstrukturen, Leichtbauweise, Schwimmtüchtigkeit

In Verbindung mit einer mechanisch stabilen Oberfläche wird nach dreidimensionalen Konstruktionen gesucht, die ebenfalls durch eine hohe Stabilität bei maximaler Belastung ausgezeichnet sind. Belastende Faktoren können wiederum der Wind, aber ebenso das Wasser, Gewichte, Volumenveränderungen und Erderschütterungen sein. Sollen uns Pflanzen als Vorbilder für eine entsprechende technische Lösung dienen, begeben wir uns in die jeweiligen Gebiete auf unserem Planeten, in welchen natürlicherweise diesbezüglich Extreme herrschen. In Florida beispielsweise treten regelmäßig Hurrikane auf, an die die Palmen mit ihren schopfartig angeordneten gefalteten Blättern hervorragend angepasst sind (Abb. 14a–b). Dennoch findet eine solche Angepasstheit in Form einer Auffaltung der Blattspreiten ihre Grenzen; gelegentlich begegnen wir schopflosen Palmenleichen (Abb. 14c).

Palmen, die sich an Felsküsten „verirrt“ haben, laufen zusätzlich Gefahr von mächtigen Wellen getroffen zu werden (Abb. 14d). Die Faltstruktur ihrer Blätter trägt wieder wesentlich zu ihrem Überleben bei. Die Autoren dieses Artikels sind immer wieder beeindruckt von den stark in Mitleidenschaft gezogenen Exemplaren der Zwergpalme (*Chamaerops humilis*), der einzigen Palmen-Art im Mittelmeergebiet, wenn man von der nur kleinräumig verbreiteten Kretischen Dattelpalme *Phoenix theophrasti*⁹ absieht. Das Areal von *Chamaerops humilis* umfasst den westlichen und zentralen Mittelmeerraum; auf Sizilien ist sie an mehreren meernahen Standorten zu finden, wo sie dominant in sog. Zwergpalmen-Garigues ist (Abb. 14d). Ihre Blattspreiten sind fächerartig zerteilt (Abb. 14e). Es handelt sich jedoch nicht um eine echte Fiederung, die entwicklungsgeschichtlich auf eine Randmeristem-Fraktionierung (Abb. 3 in Leins & Erbar 2017) zurückzuführen ist, sondern durch ein Zerreißen der Blattspreite bei deren Entfaltung, also sehr spät, zustande kommt.¹⁰ Es werden, wie in den Schaubildern (Abb. 14g–h)

⁹ *Phoenix theophrasti* kommt nur an wenigen Standorten auf Kreta und an der Südwestküste der Türkei vor.

¹⁰ Neben der Fächerform (Fächerpalmen) gibt es die Fiederform (Fiederpalme, z. B. Dattelpalme, *Phoenix*), die ebenfalls auf ein Zerreißen zurückgeht. Letztere ist bei Wind weniger stabil.

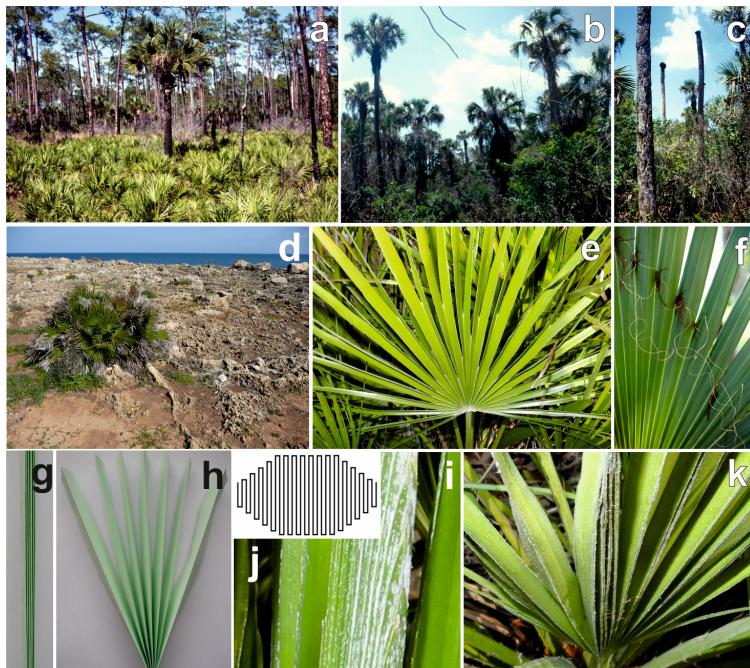


Abbildung 14: Faltstrukturen bei Palmenblättern. – a–c, Verschiedene Palmen Floridas. – a, Im Hintergrund: Palmettopalme *Sabal palmetto*, im Vordergrund (kriechend): Sägepalme *Serenoa repens*. – b–c, Königspalme *Roystonia regia*. – d–e, i–k, Zwergpalme (*Chamaerops humilis*). – d, Standort an der Felsküste im Südosten Siziliens (Riserva naturale orientata Oasi faunistica di Vendicari). – e, Gefächerte Blattspreite. – i, Deren eng gefaltete Anlage mit schematisiertem Querschnitt (j). – k, In Entfaltung begriffen. – f, Ausschnitt aus einem Fächerblatt einer tropischen Palmenart (Thailand) mit Nekrosefäden zwischen den Fächerzipfeln. – g–h, Papiermodell einer Fächerblattentfaltung. Bildquellen: Eigene Aufnahmen.

veranschaulicht, an jeder zweiten Kante¹¹ der Faltstruktur nekrotische schmale Streifen gebildet, die vielfach bei tropischen Palmen-Arten als herabhängende Fäden zu erkennen sind (Abb. 14f). Bei der Zwergpalme sind die schmalen nekrotischen Bereiche an den Kanten als weiße Streifen zu erkennen (Totalreflexion des Lichts an den lufterfüllten abgestorbenen Gewebestreifen; Abb. 14i, k). Die

¹¹ Bei *Chamaerops humilis* treten zusätzlich Trennstreifen von der Peripherie des Blattes her an jeder Kante auf.

frühe Faltung der Palmlätter und die außerordentlich dichte Faltenanordnung ermöglicht eine völlig unkomplizierte Flächenvergrößerung bei gleichmäßigem Wachstum (Abb. 14j). Die Kantenbildung eines zäh-elastischen Systems bedingt ein ständiges Ausweichen aus einer Krafteinwirkung, z. B. Wind, das sich in einem Schlingern der Blattsegmente bzw. des gesamten Blattes bemerkbar macht.

Dass ein senkrecht auf eine freistehende Faltstruktur wirkender Lastendruck gegenüber einer ebenen Fläche wesentlich erhöht werden kann, zeigt ein einfacher Versuch: Man legt ein Blatt Papier auf eine Schüssel und kippt Kochsalz darauf; bereits eine kleine Menge führt zu einer Verformung. Faltet man dasselbe Blatt Papier, so hält sie einer mehrfachen Belastung stand, bevor es aus der Form gerät (vgl. Abb. 15a–d). Faltstrukturen eignen sich in Brücken sehr gut als Stabilisatoren (Abb. 15e). Man denke aber einfach auch nur an Verpackungskartons aus Wellpappe. Es geht dabei nicht nur um eine Gewichtsreduzierung, sondern bei gleicher Größe weist ein Karton aus zweiwelliger Pappe eine deutlich höhere Belastbarkeit auf als der aus einwelliger Pappe (30 kg bzw. 20 kg).

Schließt man eine gleichmäßig gefaltete Fläche zu einem Zylinder (Abb. 15f), so erhalten wir den Umriss eines Rippenkaktus (Abb. 15g–h), eine häufige Stammform der Kakteenengewächse (Cactaceae). Einer der beiden größten Rippenkakteen ist der Saguaro *Carnegiea gigantea*, der in den südwestlichen USA und in Mexiko beheimatet und durch manche „Western“ bekannt geworden ist.¹² In seinem Stamm soll ein ausgewachsener Saguaro (bei 10–12 m Höhe und einem Gewicht von 6–8 Tonnen) ein Wasserreservoir von 2000–3000 (Walter 1973) oder gar 4000 Litern (Pfadenhauer & Klötzli 2014) haben. Nach einem ausgiebigen Gewitterguss kann er bis zu 750 l Wasser absorbieren (Mabberly 2008). Während einer langen Trockenperiode kann er diese Wassermenge durch Transpiration wieder verlieren – also ein ständiger Wechsel des Innenvolumens. Dies vollzieht sich, ohne dass es zu Spannungen in der Oberfläche kommt. Die Oberfläche bleibt nämlich dieselbe, ob die Rippen sich nähern und schmäler werden (bei Trockenheit) oder sich voneinander weg bewegen und an Breite gewinnen (bei Wasseraufnahme; Abb. 15k). Man spricht vom Blasebalg- oder Ziehharmonika-Effekt. Der Blasebalg und die Ziehharmonika sind sicherlich nicht von den Kakteen, die nur in Amerika vorkommen, abgeguckt. Der Blasebalg ist schon sehr früh zum Feueranzünden vom

¹² Gleichgroß, oder sogar noch etwas größer, ist der Cardón (*Pachycereus pringlei*) mit ähnlichem Verbreitungsareal (aber die beiden Kakteen-Arten kommen nie nebeneinander vor).

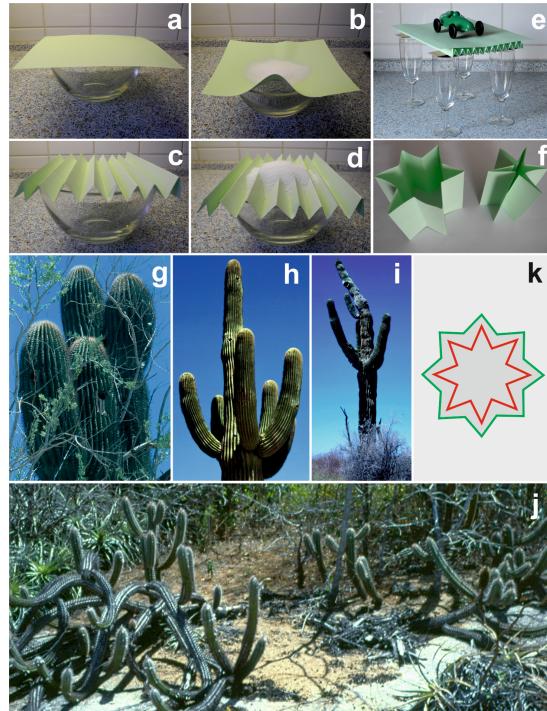


Abbildung 15: Stabilität von Faltstrukturen. – a, Ungefaltetes Blatt Papier mit Salz beladen verformt sich schon bei geringer Last (b). – c–d, Das gleiche Blatt Papier gleichmäßig gefaltet, verformt sich erst bei einer mehrfachen Last. – f, Faltstruktur zu einem im Querschnitt sternförmigen Zylinder bewirkt Blasebalg- bzw. Ziehharmonika-Effekt. – g–i, Saguars (*Carnegiea gigantea*) verschieden Alters. Die Löcher, die sich an ihren Sprossen befinden, sind Eingänge zu Vogel-Bruthöhlen (von Schrei-Eule und Gila-Specht). Allzu viele Nester können zu Instabilitäten führen (i). – g, Im Bereich eines zeitweise wasserführenden Trockenflusses (wash) gedeiht die „Ammenpflanze“ (*Parkinsonia florida*, Fabaceae) noch in der Nähe des Saguaro (an trockeneren Standorten gräbt der Saguaro irgendwann seiner Ammenpflanze regelrecht das Wasser ab). – j, *Pilosocereus gounellei* am Randes eines Inselbergs (im Rücken des Photographen) bei Alagoinha (Bundesstaat Pernambuco, NO-Brasilien) mit Blick in einen Kakteen-Trockenbusch einer brasilianischen Caatinga (Dornstrauchsavanne). – k, Rot umrandeter Querschnitt eines Rippenkaktus nach längerer Trockenzeit, grün umrandet nach einem heftigen Gewitterregen im Sommer oder länger anhaltendem leichten Regen im Winter; die Volumenzunahme und -abnahme verlaufen völlig reibungslos, indem sich lediglich die Abstände der Rippenaußenkanten verändern (die Umrisslinie der steifen Außenhaut bleibt gleichlang); in Anlehnung an Spalding 1905 und Walter & Breckle 1984. Bildquellen: Eigene Aufnahmen.

Menschen parallel erfunden worden ohne genauere Kenntnis vom Wasserhaushalt der Kakteen zu jener Zeit.

Stabilisierung von Konstruktionen der Leichtbauweise finden wir vielfach bei schwimmenden Objekten. Spektakulär in dieser Hinsicht sind die beiden Riesen-Seerosen-Arten *Victoria amazonica* und *V. cruziana* aus der Familie der Seerosengewächse (Nymphaeaceae). Ihre riesigen kreisförmigen Blattspreiten mit aufgerichtetem Rand (Abb. 16a) und ein in der Mitte auf der Unterseite ansetzendem unter Wasser befindlichen Blattstiel (Abb. 16b–c) können einen Durchmesser von bis zu 3 m aufweisen. Die Heimat ist das tropische Südamerika. Die Pflanzen werden oft in Botanischen Gärten kultiviert, und man kann auf Postkarten und Bildern im Internet bisweilen Kinder auf den schwimmenden Blattspreiten liegend, sitzend oder stehend sehen, um deren Stabilität trotz relativ sparsamen Baumaterials zu demonstrieren. Außerhalb des Wassers ist es mit der Stabilität

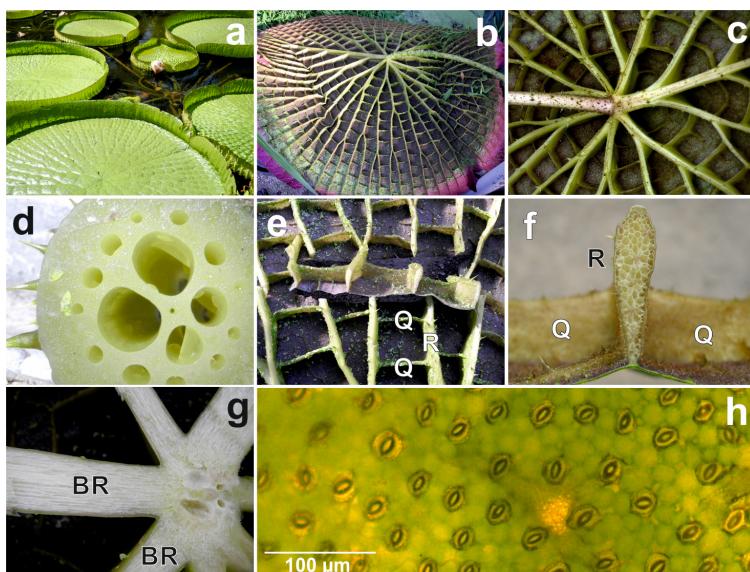


Abbildung 16: Große Seerose *Victoria*. – a, Riesige gestielte, schwimmende Blattspreite umgeben eine Blüte. – b, Blattspreite umgedreht mit Blattstielaufsatz. – c, Ausschnitt mit vom Blattstielaufsatz abzweigenden Radialeisten. – d, Interzellularenmuster im Blattstiel. – e, Radial- und Querleisten. – f, Eine Radialeiste quer geschnitten. – g, Schnitt durch die „Verteilerstelle“ am Blattstielaufsatz. – h, Epidermis der Blattoberseite mit Spaltöffnungen. BR = Basis der Radialeiste, R = Radialeiste, Q = Querleiste. Bildquellen: Eigene Aufnahmen.

der Blattkonstruktion jedoch am Ende. Die Baueigentümlichkeiten stehen ganz in der Angepasstheit an die Auftriebskraft des Wassers. Ihre Fragilität an der Luft macht sich durch Falten und teilweise auch Risse bemerkbar (Abb. 16b).

Schnell werden wir der Angepasstheit im Einzelnen gewahr, wenn wir die Morphologie und Anatomie des Blattes bei der Großen Seerose studieren. Auf der Spreitenunterseite gehen von der Ansatzstelle des Blattstiels strahlenförmig radiale Leisten, die wie der Blattstiel selbst bestachelt sind, aus, die sich zur Spreitenperipherie mehrfach dichotom verzweigen (Abb. 16b–c). In diesen Leisten (Abb. 16f zeigt einen Leistenquerschnitt) verlaufen schmale Leitgewebe, umgeben von einem lufthaltigen dünnwandigen Gewebe. Größere Lufträume (Interzellularen) bilden im Blattstiel ein fast regelmäßiges Muster (Abb. 16d). Sie stehen mit den zahlreichen schmalen Luftkanälchen (Interzellularen) der radialen Leisten in Verbindung, wie aus einem Schnitt an der „Verteilerstelle“ des Blattstielansatzes zu entnehmen ist (Abb. 16g; BR = Basis der radialen Leisten). Die radialen Leisten (R in Abb. 16e) sind miteinander durch niedrigere Querleisten (Q in Abb. 16e–f) verbunden. Das filigrane Leistensystem ist in der Lage das eigentliche Chlorophyll haltige Gewebe, das sog. Mesophyll, welches zusammen mit der umgebenden Epidermis recht dünn ist, auf dem Wasser, und zwar nur auf dem Wasser, stabil zu halten. Die abschließende Gewebsschicht (Epidermis) der Blattoberseite ist von unzähligen Spaltöffnungen besetzt (dienen dem Gasaustausch und der Transpiration; Abb. 16h).

Eine Schwimmfähigkeit wird – dies gilt für pflanzliche Organe oder Organteile allgemein – durch ein ausgedehntes System von lufterfüllten Räumen (Interzellularen) gewährleistet. Zufällige Veränderungen an unterschiedlichen Stellen des Lebenszyklus während der Evolution mündeten über das Auswahlprinzip (natürliche Selektion) in eine perfekte (oder fast perfekte¹³) Angepasstheit an das Schwimmen auf dem Wasser. So konnte beispielsweise das Wasser zu einem Medium (oder Vehikel) bei der Ausbreitung der Samen genutzt werden. Denken wir etwa an die Ausbreitung der Frucht der Cocos-Palme (*Cocos nucifera*): Die Schwimmfähigkeit erhält sie durch das Auflösen der Gewebe zwischen den Leit-

¹³ Mit einem Kompromiss ist immer dann zu rechnen, wenn eine Problemlösung mit weiteren Angepasstheiten in einem „Interessenkonflikt“, besser Zielkonflikt, steht. Auch aus Kompromissen kann die Technik u.U. viel lernen.

bündeln unterhalb einer ledrigen Außenhaut und außerhalb eines harten Steinkerns, der den eigentlichen Samen umgibt (vgl. Erbar & Leins 2018).

Wenn wir die Dünen-Trichternarzisse *Pancratium maritimum* (Amaryllidaceae) an den Küsten des Mittelmeeres heranziehen (Abb. 17a), so sind es nicht Früchte, sondern die Samen selbst, deren Samenschale vollgepackt mit toten lufthaltigen Zellen ist (Abb. 17b–c; vgl. wieder Erbar & Leins 2018). Es liegt nahe, diese reich gekammerte Umhüllung auch als mechanischen Schutz des Samens zu sehen. Wenn die äußeren luftfüllten Zellen mechanisch verletzt werden – z. B. falls die Samen durch den Wind über sandige Flächen als sog. Bodenläufer (eine zusätzliche Ausbreitungsmöglichkeit) getrieben werden – kann die Schwimmfähigkeit ohne Einschränkung erhalten bleiben. Die Sicherheit ist um so höher, je höher die Zahl der Hohlräume ist und je stärker und dichter die Trennwände (Zellwände) aneinanderschließen. „Die Schotten dicht machen“ ist eine Redewendung aus der Seeschifffahrt. Tatsächlich können die Trennwände in der Samenschale der Trich-

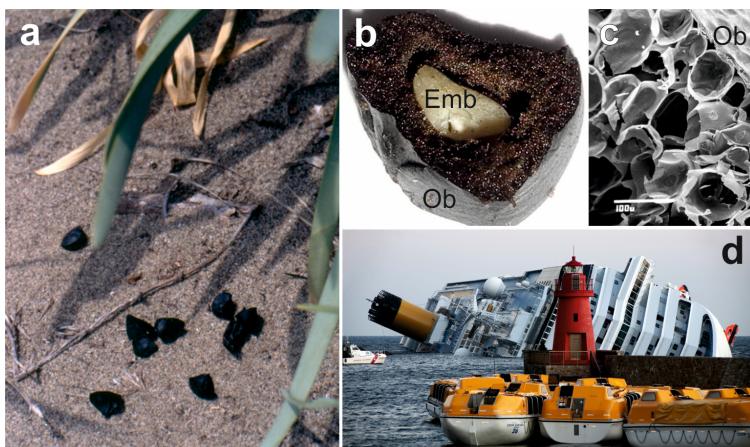


Abbildung 17: Schwimmfähigkeit. – a–c, Samen der Dünen-Trichternarzisse *Pancratium maritimum* (Amaryllidaceae). – a, Aus der Frucht entlassene Samen am Strand in der Nähe der Mutterpflanze. – b, Samen aufgeschnitten; eine dicke, aber stark luftgefüllte und dadurch leichte Samenschale umhüllt den Embryo (Emb). – c, Peripherer Ausschnitt der Samenschale im rasterelektronenmikroskopischen Bild mit Luftgewebe und glatter Oberfläche (OB). – d, Havarie der „Costa Concordia“: Das auf Grund liegende Kreuzfahrtschiff, im Vordergrund einige Rettungsboote im Hafen von Giglio. Bildquelle siehe unter „Bildnachweise aus dem Internet“. Bildquellen a–c: Eigene Aufnahmen.

ternarzisse mit den Schotten im Schiffsrumph eines Personenschiffs verglichen werden. Sind die Schotten durch Öffnen von Schottentüren nicht dicht verschlossen oder sind von vornherein zu wenige vorhanden, ist die Gefahr des Sinkens des Schiffes nach einer Havarie erhöht (siehe etwa die „Costa Concordia“, Abb. 17d; Culjak 2014).

2.6 Stabilitätsaspekte in der Architektur

„Festen Boden unter den Füßen“ – das haben die Bäume, die im „Wackelwald“ (eine Attraktion bei Bad Buchau, Baden-Württemberg) wachsen, nicht. In diesem Waldgebiet liegt unter einer nur 30 cm dicken Bodenschicht aus Torf eine etwa 6 m mächtige, puddingartige Masse aus Ablagerungen des nahe gelegenen, früher größeren Federsees. Die Anpassung, eine ausreichende Standfestigkeit der Bäume zu erreichen, besteht in der Fähigkeit sog. Brettwurzeln auszubilden, kräftige, fast horizontale, durch einseitiges sekundäres Dickenwachstum brettartige Wurzeln an der Basis des Stammes. Diese Fähigkeit ist genetisch bedingt, wird aber nur bei starker Bodennässe genutzt; im Wackelwald handelt es sich bei den Bäumen mit Brettwurzeln meist um die Moor-Birke *Betula pubescens* (Betulaceae; Abb. 18a). Ein wellenartiges Schwanken des Waldbodens ist zu spüren, wenn ein Wind die Bäume hin und her bewegt, übertragen über deren flach ausgebreitetes Wurzelwerk.

Wer zum ersten Mal vor einem bis zu 60 m hohen Baumriesen in einem tropischen Regenwald, z. B. in Thailand (*Ficus spec.*, Abb. 18b) steht, ist geradezu überwältigt von der Mächtigkeit der Brettwurzeln, die pfeilförmig bis zu 9 m den Stamm heraufreichen können. Das Vorkommen derartiger Wurzeln ist eine Angepasstheit an die relativ dünne Bodenschicht im tropischen Regenwald. Die Bäume sind wiederum Flachwurzler, deren Wurzelsystem meist eine Tiefe von nur 30 cm erreicht. Die hohe Standfestigkeit durch die schräg nach oben verlaufenden Brettwurzeln wird in der Architektur beispielsweise beim Bau eines großen Hotels im Erdbeben-Hotspot San Francisco (USA) nachgeahmt (Abb. 18c–d). Die Gästezimmer befinden sich ausschließlich in der Peripherie gegenseitig sich stützender Fronten und sind durch Galerien zugänglich. Die Wohnfronten lassen eine riesige repräsentative Halle zwischen sich.

Ein anderes Bauprinzip eines „erdbebensicheren“ Hotels findet sich beispielsweise in Yokohama (Japan; Abb. 19e–f), die hervorragende Biegefertigkeit von



Abbildung 18: Vorbild Brettwurzeln. – a, Stammbasis mit Brettwurzel einer Moor-Birke *Betula pubescens* im Wackelwald bei Bad Buchau. – b, Brettwurzeln eines Regenwaldriesen im tropischen Regenwald in Thailand. – c–d, Nachahmung in der Architektur eines „erdbebensicheren“ Hotels in San Francisco (Hyatt Regency); Näheres siehe Text. – c, Bildquelle siehe unter „Bildnachweise aus dem Internet“. Bildquellen a–b: Eigene Aufnahmen.

Grashalmen, namentlich des Bambus, nachahmend (Abb. 19a–d).¹⁴ Der Wohntrakt nimmt die Wand eines riesigen Hohlzylinders ein (die Zimmer sind entsprechend klein!). Einzelne Diaphragmen, die dem Achsenteil eines Grasknotens (an dieser Stelle entspringen die Blätter) entsprechen, verhindern beim Biegen Knicke, erhöhen also die Biegefestigkeit. Ob und in welcher Anzahl solche Trennwände in

¹⁴ Von der Biegefestigkeit konnten wir uns im Restaurant im 40. Stockwerk selbst überzeugen, als während eines heftigen Taifuns das Gebäude deutlich spürbar ins Schwanken geriet.

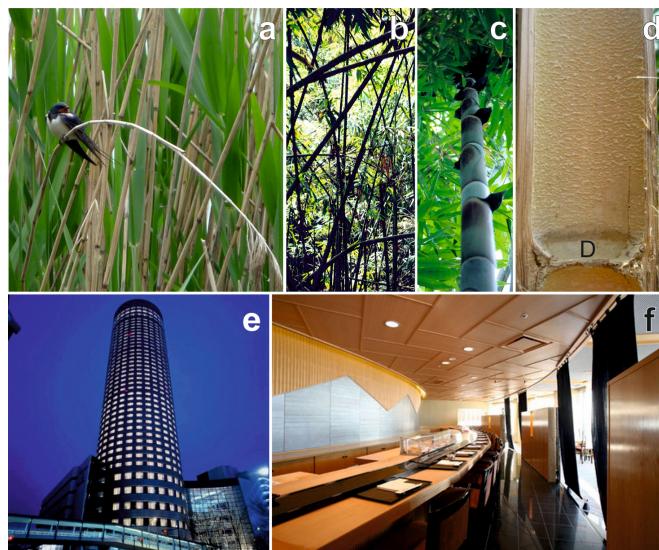


Abbildung 19: Vorbild Grashalme. – a, Schilfrohr (*Phragmites australis*). – b–d, Bambus (*Bambusa*). – b–c, Standort im Regenwald in Thailand. – d, *Bambusa vulgaris*. Längsschnitt durch die hohle Achse mit Diaphragma (D). – e, Nachbau eines „erdbebensicheren“ Hotels in Yokohama (Shin Yokohama Prince Hotel). – f, „Ringrestaurant“ in einem oberen Stockwerk (in der 40. Etage von 42). – e–f, Bildquellen siehe unter „Bildnachweise aus dem Internet“. Bildquellen a–d: Eigene Aufnahmen.

dem besagten Hotel vorhanden sind, entzieht sich unserer Kenntnis. Ganz oben befindet sich ein Restaurant, das ebenfalls ringförmig gestaltet ist (Abb. 19f).

3 Von raffinierten Strategien bei Organismen in einem Ökosystem: Fressen und Gefressenwerden, Mutualismen, Täuschen, Betrügen, Töten

Im „Fressen und Gefressenwerden“, quasi dem Hauptthema in einem Ökosystem¹⁵, ist der Fressende natürlich im Vorteil, der Gefressene hat Pech gehabt. Schutz vor dem Gefressenwerden bieten Unterschlupf oder Tarnung. Dafür gibt es

¹⁵ Ökosysteme sind Lebensgemeinschaften, in denen Produzenten (grüne Pflanzen), Konsumenten (meist Tiere) und Destruenten (z. B. Mikroorganismen) im momentanen Gleichgewicht stehen.

viele Beispiele. Denken wir etwa an die Arten der Stabschrecken (Bacteriidae), die in Körperform und Färbung trockene Äste nachahmen und, wenn sie auf einem Geäst eines Holzgewächses sitzen, unauffällig sind, oder die grasgrüne Schwertschrecke *Conocephalus dorsalis* (Conocephalidae; Abb. 20a), die auf nassen Wiesen zu finden ist. In der Abbildung befindet sich auch der Beutejäger, der die Schwertschrecke dennoch aufgespürt hat und in sein röhrenförmiges Nest (z. B. in einem „Insektenhotel“) verfrachtet. Es ist eine aus Mexiko stammende schwarze Wespe, die man Stahlblauer Grillenjäger (*Isodontia mexicana*) nennt. Diese Grabwespen- (Sphecidae-) Art ist in den 1960er Jahren nach Südfrankreich eingeschleppt worden, hat sich von dort aus auf weite Teile Südeuropas ausgebreitet und ist 2010 ins mittlere Oberrheintal gekommen.

Sandige Böden, auf denen oft tote dunklere Pflanzenreste liegen, besiedelt die zu den Feldheuschrecken (Acrididae) gehörende *Oedipoda caerulescens* (Abb. 20b). Auf letztere wird man lediglich bei ihrem Auffliegen aufmerksam; ihre Unterflügel sind hellblau, was ihr den Namen, Blauflügelige Ödlandschrecke, gibt.

Wenig gegen den Untergrund kontrastiert sind viele Schwebfliegen-Arten, wenn diese auf gelben Blüten bzw. Blütenständen sitzen (Abb. 21a, Gemeine Sumpfschwebfliege *Helophilus pendulus* auf der Kanadischen Goldrute *Solidago canadensis*, Asteraceae). Hinzu kommt hier noch ihre optische Erscheinung: Die

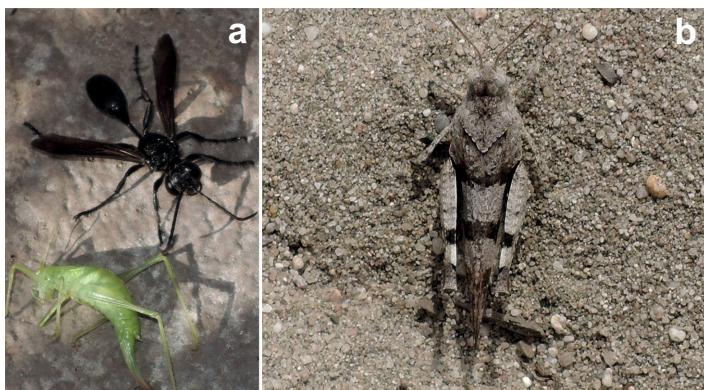


Abbildung 20: Tarnung. – a, Grasgrüne Schwertschrecke *Conocephalus dorsalis* vom Stahlblauen Grillenjäger *Isodontia mexicana* erbeutet (photographiert 2020 in Heidelberg-Handschuhsheim). – b, Blauflügelige Ödlandschrecke *Oedipoda caerulescens* (Binnendünen bei Sandhausen, Baden-Württemberg). Bildquellen: Eigene Aufnahmen.

schwarz-gelbe Bänderung erinnert an jene vieler Wespen. Wespen haben für viele potentielle Raubfeinde die unangenehme Eigenschaft ihres Stechens. Wenn beispielsweise Vögel, Kröten, Eidechsen oder kleine Säugetiere durch einen Wespenstich schlechte Erfahrungen gemacht haben, werden sie in Zukunft von solchen Insekten ablassen. Unbewehrte Insekten, die, wie Klaus Lunau (2011) es in seinem empfehlenswerten Buch beschreibt, einen „Wespenharnisch“ tragen, profitieren erheblich, denn die schwarz-gelbe Bänderung bzw. Ringelung ist bei erfahrenen räuberischen Tieren unmittelbar mit Gestochenwerden verknüpft.

Harmlose Insekten mit Wespenharnisch finden sich vielfach oft nah zusammen mit Echten Wespen. Abb. 21b zeigt links oben eine Borstige Dolchwespe *Scolia hirta* auf dem reichblütigen Gesamtblütenstand vom Gewöhnlichen Wasserdistel *Eupatorium cannabinum* (Asteraceae). Im Ausschnitt darunter betätigen sich zwei Individuen der Großen Sumpfschwebfliege *Helophilus trivittatus* pollenschluckerweise bei der Bestäubung. Zusammen mit Honigbienen hält sich oft auch die Hainschwebfliege *Episyrphus balteatus* auf der normalerweise windbestäubten *Artemisia vulgaris* (Gewöhnlicher Beifuß, Asteraceae) auf (Abb. 21c). Vielleicht findet auch die Fleischfliege *Poliates lardaria* mit ihrer schwarz-grauen Bänderung einen gewissen Schutz. Sie ist oft auf Doldenblütlern (Apiaceae), beispielsweise auf *Angelica sylvestris* (Wald-Engelwurz), zusammen mit Wespen unterwegs (Abb. 21d).

Auch manche Käfer sind im Verlauf der Evolution mit einem, wenngleich weniger exakt gemusterten „Wespenharnisch“ ausgestattet worden. In der Abb. 21e ist ein Bockkäfer aus den schwierig zu bestimmenden Schmalbock-Arten der Gattung *Strangalia* wieder auf der Doppeldolde von *Angelica sylvestris* in Begleitung von Wespen zu finden (Abb. 21e). Ein friedliches Nebeneinander zwischen Dunklen Erd-Hummeln (*Bombus terrestris*) und einem mit gebänderten Deckflügeln versehenen Käfer, nämlich dem Gebänderten Pinselkäfer *Trichius fasciatus* auf dem Blütenkopf der Gewöhnlichen Kratzdistel *Cirsium vulgare* (Asteraceae) ist kein seltener Anblick (Abb. 21f).

Die Bänderung auf den Deckflügeln der blütenbesuchenden Bockkäfer können innerhalb einer Art variabel sein. Variabel ist sie auch beim Pinselkäfer. Es wird diesbezüglich genetisch gesehen „gespielt“, und dabei mögen vielleicht auch Umwelteinflüsse eine Rolle spielen. Wir müssen stets daran denken, dass die Käfer ihr Muster nicht aussuchen können. Sie sind auf den Zufall angewiesen, und ihre Muster ähneln mal mehr und mal weniger einem Wespenmuster. Es ist nicht ganz

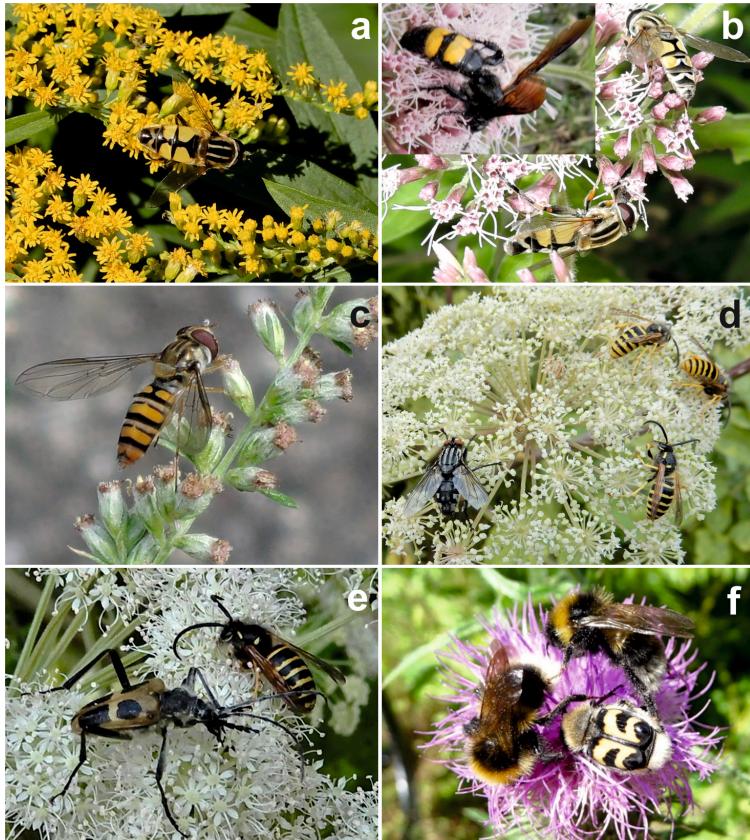


Abbildung 21: Harmlose Insekten tarnen sich mit einem „Wespenharnisch“. – a, Gemeine Sumpfschwebfliege *Helophilus pendulus* auf der Kanadischen Goldrute *Solidago canadensis*, Asteraceae. – b, Links oben: Borstige Dolchwespe *Scolia hirta*, rechts und unten: Große Sumpfschwebfliege *Helophilus trivittatus* auf dem gleichen Blütenstand vom Gewöhnlichen Wasserdost *Eupatorium cannabinum* (Asteraceae). – c, Hainschwebfliege *Episyrphus balteatus* ernährt sich vom Pollen des Gewöhnlichen Beifuß *Artemisia vulgaris* (Asteraceae). – d, Eine Fleischfliege (*Polistes lardaria*) mit ihrer schwarz-grauen Bänderung hält sich gerne in der Nähe von Wespen auf Doldenblüttern (Apiaceae) auf (hier auf einem Blütenstand der Wald-Engelwurz *Angelica sylvestris*). – e, Ein sehr grob schwarz-gelb gebänderter Schmalbock-Käfer der Gattung *Strangalia* nahe bei einer Wespe ebenfalls auf dem Blütenstand der Wald-Engelwurz. – f, Ein Gebänderter Pinselkäfer *Trichius fasciatus* auf dem Blütenkopf der Gewöhnlichen Kratzdistel *Cirsium vulgare* (Asteraceae) zusammen mit zwei Erd-Hummeln (*Bombus terrestris*). Bildquellen: Eigene Aufnahmen.

einfach einen Schwellenwert herauszufinden, ab wann die Wirksamkeit auf Prädatoren bei immer stärkerer „Vereinfachung“ des Musters nicht mehr vorhanden ist. Die Autoren des vorliegenden Artikels haben vielfach die Beobachtung gemacht, dass sich die betreffenden grob gemusterten Insekten beim Besuch von großen Blumen (Blütenständen) gerne in der Nähe von Wespen aufhalten.

Experimente haben gezeigt, dass Augen, die häufig auf Schmetterlingsflügeln imitiert werden, z. B. beim Tagpfauenauge *Aglais io* (Abb. 22a), eine auf Fressfeinde, z. B. Vögel, abschreckende Wirkung haben (siehe etwa Vallin et al. 2005). Dies ist auch für andere „Augenfalter“ wie etwa den Weißbindigen Bergwald-Mohrenfalter *Erebia euryale* (Abb. 22b) anzunehmen. Ähnliches gilt wahrscheinlich auch für die auffallend große Raupe des Mittleren Weinschwärmers *Deilephila elpenor* (Abb. 22c–d). Die Raupe hat einen relativ kleinen Kopf (Pfeile in Abb. 22c–d) mit äußerst scharfen Mandibeln, mit denen sie im rasanten Tempo die Blätter (hier vom Drüsigen Springkraut *Impatiens glandulifera*) Stück für Stück zersägt und einverleibt. Über dem Bereich der Brustbeine und kurz dahinter finden wir beidseits zwei „gar schaurig“ dreinschauende Augenpaarimitate. Diese werden in besonderer Weise „gefährvoll“ präsentiert, wenn man ihr nahe kommt, indem sich der Bereich über den bleichen Brustbeinen aufbläht und der Vorderkörper sich hin und her bewegt. Nach Lunau (2011) verstärkt sich hierdurch der Eindruck eines Schlangenkopfes.

Eine Tarnung und damit verbunden aus dem Hinterhalt zu töten, ist uns aus unserem menschlichen Dasein wohl bekannt. Ob als Jäger oder Terrorist oder allgemein bei „modernen“ kriegerischen Auseinandersetzungen oder ganz einfach bei einem Banküberfall oder bei der Fallenstellung zum Töten von Insekten oder ... oder ... bedient sich der Mensch mancher Tricks aus der „Trickkiste“ der Evolution, die schon viele, viele Millionen Jahre alt sind.

Töten aus dem Hinterhalt mit Hilfe einer nicht zu überbietenden Perfektion der Tarnung lässt sich (jedes Mal mit großem Staunen!) bei der Veränderlichen Krabbenspinne *Misumena vatia* (Abb. 23a) beobachten. Diese Krabbenspinne ist in der Lage einen Farbwechsel durchzuführen: Auf weißen Blüten oder Blütenständen auf Beute wartend (meist Fliegen) nimmt sie eine weiße Farbe an, auf gelben eine gelbe Farbe. Verantwortlich für die Gelbfärbung ist ein flüssiger gelber Farbstoff, der vom Innern des Körpers in die obere Zellschicht verlagert wird. Dieser Vorgang kann Tage dauern, wie aus der profunden Schilderung von Heiko



Abbildung 22: Augenimitationen haben auf Fressfeinde eine abschreckende Wirkung. – a, Je zwei Augenattrappen auf der Flügeloberseite des Tagpfauenauge *Aglais io*. – b, Weißbindiger Bergwald-Mohrenfalter *Erebia euryale*. – c–d, Raupe des Mittleren Weinschwärmer *Deilephila elpenor* mit beidseits zwei Augenpaarimitationen. Die Pfeile weisen auf den kleinen Kopf. Bildquellen: Eigene Aufnahmen.

Bellmann (2010) zu entnehmen ist. Der Farbwechsel wird über den Gesichtssinn ausgelöst.

Eine weitere Färbung kommt bei der Gehöckerten Krabbenspinne *Thomisus onustus* vor. Diese Spinne kann sich auf gelben, weißen und hellvioletten Blumen mit der entsprechenden Färbung anpassen. Sie unterscheidet sich von der vorigen Spinnen-Art in der Form des Hinterleibs. *Thomisus onustus* hat einen kantigen Hinterleib mit der breitesten Kante an dessen Ende; bei *Misumena* ist der Hinterleib mehr oval-kugelig. In Abb. 23b hat eine *Thomisus onustus*-Spinne auf dem Blütenkopf von *Glebionis coronaria* (Kronenwucherblume, Asteraceae) eine Fliege, in Abb. 23c ein Hosenbienen-Weibchen (*Dasypoda hirtipes*) gefangen. Das Fangen erfolgt immer auf die gleiche Weise: Bei Ankunft der zukünftigen Beute schießt die Spinne blitzschnell vor und appliziert dem Opfer zwischen Kopf und Thorax ein betäubendes Gift. Ein Hosenbienen-Männchen hat sich (Abb. 23d) – wieder auf *Glebionis* – eine weitere Krabbenspinnen-Art, nämlich

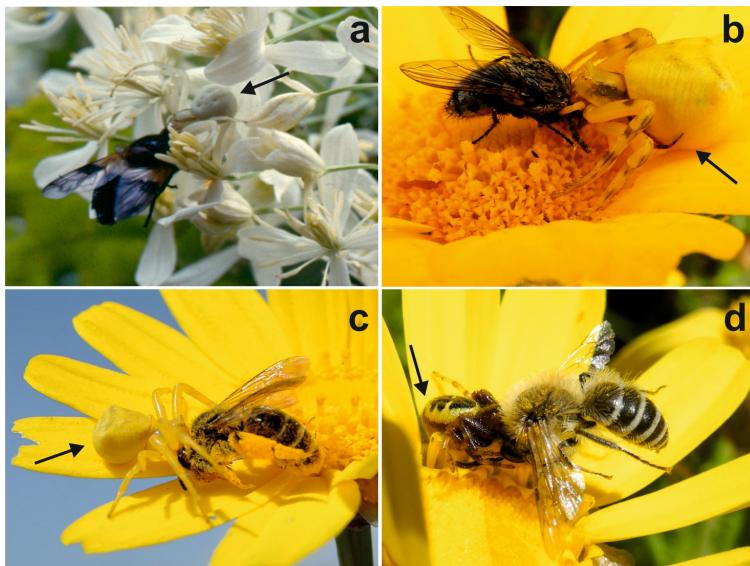


Abbildung 23: Perfekt getarnte räuberische Krabben Spinnen (Pfeile) auf weißen und gelben Blumen sind in der Lage, ihre Körperfarbe dem Untergrund anzupassen und quasi aus dem Hinterhalt besuchende Insekten blitzschnell zu lähmen. – a, Veränderliche Krabben Spinne *Misumena vatia* auf den Blüten der Aufrechten Waldrebe *Clematis recta* (Ranunculaceae) mit gefangener Fliege. – b-d, Beutefang auf den Blütenköpfen der Kronenwucherblume *Glebionis coronaria* (Asteraceae). – b, Eine Fliege wurde hier von einer Gehöckerten Krabben Spinne *Thomisus onustus* erbeutet. – c, Gehöckerte Krabben Spinne mit einem Hosenbiene Weibchen (*Dasypoda hirtipes*) als Beute. – d, Südliche Glanz-Krabben Spinne *Synema globosum* hat sich ein Hosenbiene Männchen geschnappt. Bildquellen: Eigene Aufnahmen.

die Südliche Glanz-Krabben Spinne *Synema globosum*, geschnappt. Diese weist eine (variable) schwarz-gelbe Musterung auf dem längs-ovalen Hinterleib auf. Möglicherweise hat „im Eifer des Gefechts“ das Hosenbiene Männchen den Räuber mit einem Weibchen verwechselt. Das satte glänzende Gelb an den Seiten des Spinnen-Hinterleibs imitiert, wenngleich grob, vielleicht die reich mit Pollen gefüllten Hosen an den Hinterbeinen eines Hosenbiene Weibchens, die im Kontrast zum schwarz-gelb beringten Abdomen stehen. Genauere Untersuchungen im Hinblick auf das UV-Sehen der Bienen könnten weitere Hinweise geben. Es besteht zuweilen, vor allem bei einer großen Begeisterung bei der Beobachtung von Naturphänomenen, die Gefahr einer Überinterpretation.

Von Täuschen, Betügen und Töten bleiben die Pflanzen nicht ausgeschlossen. Als vor etwa 140 Millionen Jahren oder vielleicht noch früher die Bedecktsamer (= Angiospermen = Blütenpflanzen) entstanden sind, kam es zu einem großartigen Zusammenspiel zwischen Blumen und Tieren (zunächst Insekten). Sie traten in ein mutualistisches Verhältnis ein, ein Verhältnis, das auf einem gegenseitigen Geben und Nehmen beruht: Speise (Pollenkörner oder/und Nektar) gegen Pollentransport zur Bestäubung. Nicht selten sind in verschiedenen Verwandtschaftsbereichen Blüten aus dem mutualistischen Verhältnis ausgeschert (siehe z. B. Dafni 1984, Vogel 1975, 1993, Leins & Erbar 2008, 2010, Erbar et al. 2017, Erbar 2017).

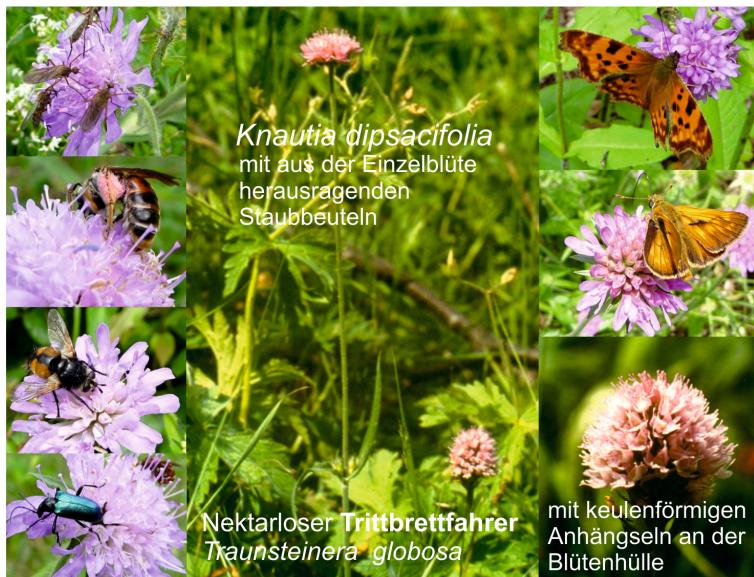


Abbildung 24: Als Trittbrettfahrer unter den Blumen sind die Blütenstände der Kugelorchis *Traunsteinera globosa* (Orchidaceae) zu nennen. Sie bietet den besuchenden Insekten weder Nektar noch Pollen als Gegengabe für den Pollentransport zum Zwecke der Bestäubung. Sie schleicht sich regelrecht in dichte Populationen der Wald-Witwenblume *Knautia dipsacifolia* (Caprifoliaceae-Dipsacoideae) ein, an deren Blütenständen sie in Farbe und Form eine bis ins Detail gehend optische Angepasstheit erfuhr. *Knautia*-Blütenstände weisen als Generalisten ein hohes Bestäuberspektrum auf; linke Seite von oben nach unten: Tanzfliegen der Gattung *Empis*; Knautien-Sandbiene *Andrena hattorfiana*; Igelfliege *Tachina fera*; Blauvioletter Scheibenbock *Callidium violaceum*; rechte Seite von oben nach unten: C-Falter *Polygonia c-album*; Rostfarbiger Dickkopffalter *Ochlodes venatus*. Bildquellen: Eigene Aufnahmen.

Relativ „harmlos“ sind die Trittbrettfahrer unter den Blumen. Die Kugelorchis (auch Kugelknabenkraut genannt) *Traunsteinera globosa* (Orchidaceae, Abb. 24 rechts unten) bildet keinen Nektar. Ihre Blütenstände haben sich (natürlich über Zufall!) in der Weise angepasst, dass sie den Blütenständen der Wald-Witwenblume *Knautia dipsacifolia* (Caprifoliaceae-Dipsacoideae) in Farbe und Form bis ins Detail ähneln. Die Kugelorchis muss sich lediglich in eine dichte Population der Knautien einschleichen, um reichlich Insektenbesuche zu bekommen; die Insekten gehen natürlich leer aus. Das hohe Bestäuberspektrum bei der Knautie sichert natürlich auch eine genügend hohe Bestäuberrate bei der Kugelorchis.

Farb – und Formveränderungen an Verpackungen gaukeln nicht selten Verbrauchern etwas vor; hier sind Werbe-Psychologen gefragt. Man ist gewohnt, Bio-Nahrungsmittel grün oder zumindest teilweise grün zu verpacken. Man schaue sich heutzutage im Supermarkt einmal die Vitrinen an und man wird feststellen, dass auf Verpackungen von Nicht-Bio-Nahrungsmitteln oft eine grüne Farbe noch hinzukommt oder sogar dominiert. In einem Supermarkt auf Madeira werden Mineralwässer unterschiedlicher Qualität mit entsprechend unterschiedlichen Preisen angeboten (Abb. 25). Das teuerste Mineralwasser im entsprechenden Regal ist das aus der Perrier-Quelle, vielen Verbrauchern als edles Mineralwasser bekannt.



Abbildung 25: (Intelligente?) Verkaufsstrategie in den Supermarkt-Regalen. Erläuterungen im Text.
Bildquelle: Eigene Aufnahme.

Warum nicht das darunter befindliche deutlich billigere Vidago kaufen? Kaufmännisch intelligent platziert, ist man unbewusst geneigt, die billigere zu nehmen, verführt vom Outfit der Flasche und des Etiketts, das sich assoziativ mit dem „Edelwasser“ vergleicht. Ein anspruchsvoller Verbraucher wird sich Zeit nehmen und prüfen, welches Wasser wirklich das bessere ist.

Übertreibung, falsches Versprechen, Irreführung, Lüge, Betrug prägen die industrielle Werbung. Täglich wird der Verbraucher in den Medien damit überschüttet. Intelligente (informierte) Verbraucher lassen sich weniger verführen. Werbung zieht vielmehr den Dummen (Uninformierten) das Geld aus der Tasche. Sind also diejenigen, die Werbung machen, die Gescheiteren? Blumen sind weder gescheit noch dumm. Sie vermögen jedoch für sich selbst durch die erwähnten Falschmeldungen sehr lange Zeiträume hinweg außerordentlich erfolgreich zu sein (z. B. Leins & Erbar 2008, 2010, Erbar 2017). Blüten können z. B. Fliegen anlocken, wenn sie – den Fresstrieb der Tiere ansprechend – stark übertreibende Nektarattrappen „ins Schaufenster“ stellen. Das Sumpf-Herzblatt oder Studentenröschen *Parnassia palustris* (Parnassiaceae) liefert ein beeindruckendes Beispiel (Abb. 26): Die einzeln stehenden Blüten besitzen fünf prinzessinenkrönchen-förmige Organe, die mit fünf Staubgefäßern alternieren. Am Ende der Krönchenzacken befindet sich jeweils ein gelbes wässrig-glänzendes Kugelchen. Der Glanz der aber völlig trockenen Attrappen röhrt von ihrer seidensatinartigen Oberfläche her (Abb. 27c). Ganz ohne Nektar sind die krönchenartigen Organe jedoch nicht; an ihrer stielförmigen Basis wird ein wenig von diesem süßen Saft aus sog. Saftspalten ausgeschieden (Abb. 27a–b), der von den Fliegen bald nach der Landung offensichtlich olfaktorisch wahrgenommen wird (Abb. 26b). Die kreisförmige Anordnung der Krönchen „zwingt“ die Fliege sich einmal wie auf einer Drehscheibe zu drehen (Abb. 28); sie nimmt dabei aus jeweils einer Anthere (Staubbeutel) mit ihrem Bauch punktförmig reichlich Pollen auf. Die Antheren werden durch Filament-(Staubfaden-) Wachstum nacheinander nach oben über die noch unreifen Narben des Fruchtknotens geschoben (Abb. 26b); bei günstiger Witterung dauert das Präsentieren der fünf Staubbeutel insgesamt fünf Tage (siehe Abb. 32 in Erbar & Leins 2020). Die leeren Antheren werden, nachdem sich ihre Filamente nach außen biegen, meistens abgeworfen. Schließlich ist die Blüte im weiblichen Zustand (Abb. 26c) und präsentiert ihre reifen Narben genau dort, wo sich zuvor die Staubbeutel befanden; exakter kann wohl eine Bestäubung durch ein mit Pollen beladenes Insekt nicht funktionieren.

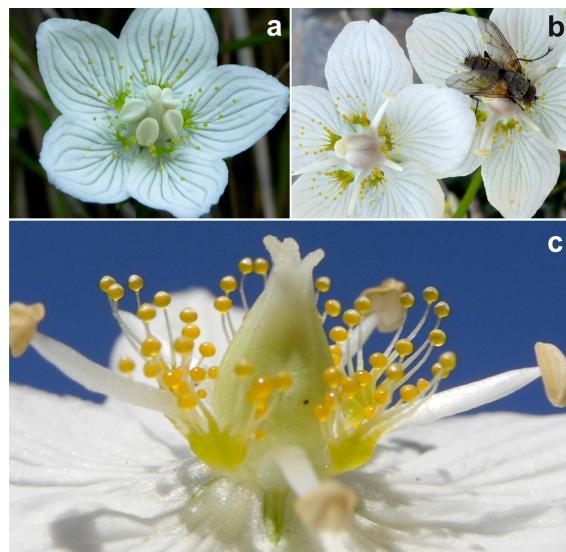


Abbildung 26: Das Sumpf-Herzblatt *Parnassia palustris* (Parnassiaceae), dessen Blüten mehr versprechen, als sie halten. Die glänzenden „Nektartropfen“ sind strohtrocken, aber locken wegen ihres Glanzes reichlich Fliegen an. Bildquellen: Eigene Aufnahmen.

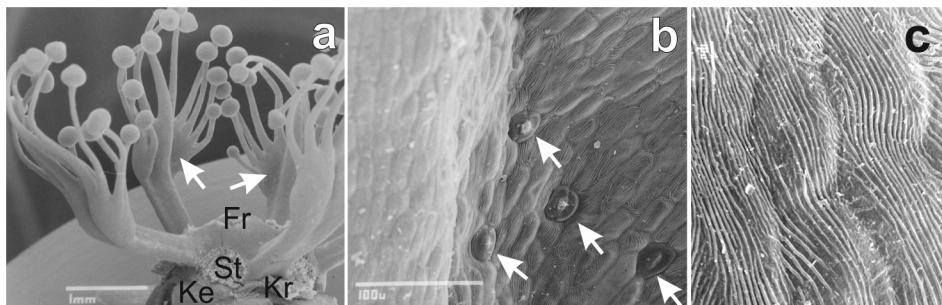


Abbildung 27: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Nektarorgane des Sumpf-Herzblatts. – a, Die angeberischen prinzessinnenkrönchenartigen Blütenorgane tragen am Ende der Strahlen kugelförmige Scheinnektarien. Kronblätter (Kr), Staubgefäß (St) und Fruchtknoten (Fr) abpräpariert; Ke = Kelchblatt. Pfeile weisen auf Nektarspalten an der stielartigen Basis. – b, Vergrößerung der Nektar sezernierenden Region mit Saftspalten (Pfeile). – c, Bogig striate Oberfläche der kugelförmigen Scheinnektarien. Aus Leins & Erbar 2008, verändert.

Neben solchen an den Fresstrieb von Insekten angepassten (im Sinne von Mehr-Schein-als-Sein) betrügerischen Blüten finden sich in den unterschiedlichsten Verwandtschaftsbereichen der Blütenpflanzen immer wieder Täuschblumen mit einseitigen Angepasstheiten an Insekten-Verhaltensmuster, die die Sexualität oder den Bruttrieb betreffen. Wohl bekannt als Sexuältäuschblumen sind diejenigen einer Reihe von Arten der Orchideen-Gattung *Ophrys* (Ragwurz; Paulus & Gack 1980, 1981, Paulus 2007). Brutplatz-Täuschblumen begegnen wir etwa bei den Osterluzeigewächsen, den Aristolochiaceae. Höchst elaboriert sind unter ihnen die Kesselfallen und Rutschbahnen der *Aristolochia*-Arten (z. B. Sprengel 1793, Vogel 1965, 1978, Leins & Erbar 2008, 2010, Erbar et al. 2017, Erbar 2017). Ebenfalls den Osterluzeigewächsen angehörende Haselwurz- bzw. *Asarum*-Arten täuschen Brutplätze vor. Bei *Asarum caudatum*, der Geschwänzten Haselwurz aus Nordamerika, hat der Brutplatzbetrug sogar Todesfolgen für die Brut.

Es war der bedeutendste Blütenbiologe des 20. Jahrhunderts, Stefan Vogel – er forschte bis ins 21. Jahrhundert hinein und hat bahnbrechende Entdeckungen

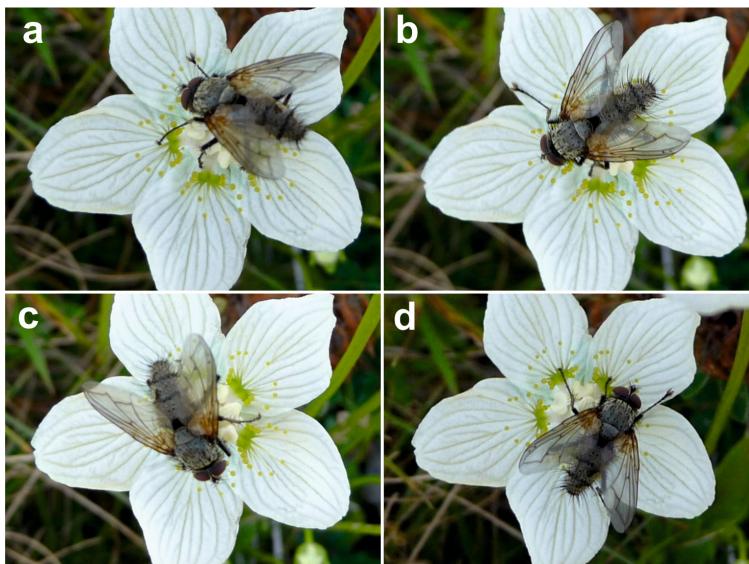


Abbildung 28: Die Blüten des Sumpf-Herzblatts sind blütenökologisch eine Drehscheibenblume. – a–d, Schnell aufeinanderfolgende Schnapschüsse eines Blütenbesuchers. Bildquellen: Eigene Aufnahmen.

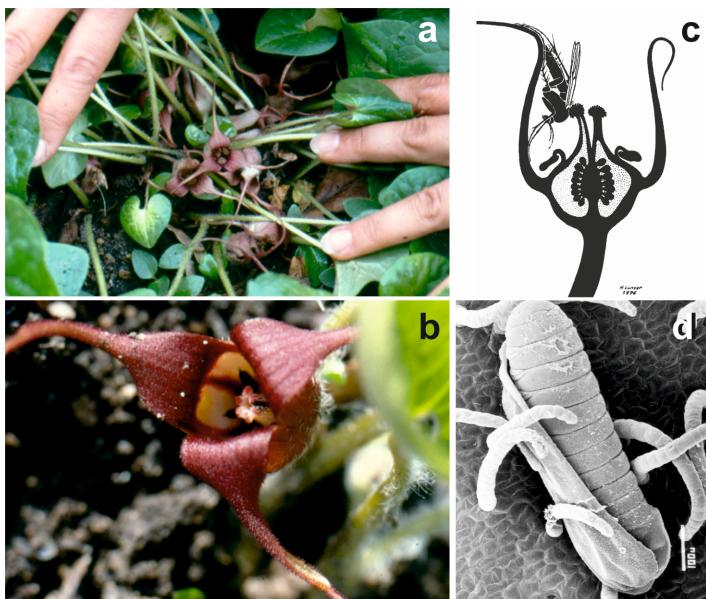


Abbildung 29: Die Blüten der Geschwänzten Haselwurz *Asarum caudatum* (Aristolochiaceae) aus Nordamerika sind betrügerische Brutplatz imitierende Täuschblumen mit Todesfolgen für die Nachkommen der besuchenden Pilzmücken (siehe Text). c aus Vogel 1978. Bildquellen a–b,d: Eigene Aufnahmen.

gemacht –, der als erster das betrügerische Verhältnis dieser Blüte gegenüber Pilzmücken aufdeckte (Vogel 1978). Auf den ersten Blick ist beim Blütenaufbau (Abb. 29a–b) kaum eine Beziehung zu den echten Brutplätzen der Pilzmücken zu erkennen. Für die Eiablage suchen die Pilzmücken feuchte, kühle Räume („feuchte Krypten“) auf, wie sie etwa zwischen Lamellen auf der Hutunterseite von Basidiomyceten- (Ständerpilz-) Fruchtkörpern vorhanden sind. Trotz ihrer dreidimensionalen Unähnlichkeit mit einem Pilzfruchtkörper werden die Blüten regelmäßig und eifrig von Pilzmücken besucht. Mit der bodennahen Position der Blüte und dem für die Pflanze notwendigen feuchten Wuchsraum des Waldbodens sind „Betrüger“ und „Opfer“ in genügende Reichweite gebracht. Die Pilzmücken, deren Gesichtssinn als nicht sonderlich ausgeprägt gilt (wohl kein exaktes Formensehen), werden höchstwahrscheinlich olfaktorisch durch einen für unsere Nase nicht wahrnehmbaren pilztypischen Geruch angelockt, der vermutlich von den rotbraun gefärbten Kelchteilen, insbesondere den Kelchschwänzen, emittiert wird.

Die weißen Flecken auf den Kelchblättern spielen sicherlich für eine optische Nahorientierung eine Rolle, viel mehr wirken sie jedoch im Hinblick auf die Fähigkeit der Pilzmücken, lokale Feuchtigkeit, „feuchte Krypten“ etwa, wahrzunehmen, als Schlüsselreiz. Die weißen Kelchfelder sind nämlich mit lebenden Haaren besetzt, die Flüssigkeit abscheiden. Tatsächlich suchen die Pilzmücken-Weibchen die weißen Felder bevorzugt auf, wobei sie mit ihrem Rücken die Narben bzw. die geöffneten Antheren berühren (Abb. 29c). Nicht selten kommt es dabei zur Eiablage. Eier und daraus entwickelte Larven, die man im Bereich der weißen Felder immer wieder finden kann, gehen sämtlich nach kurzer Zeit zugrunde (Abb. 29d).

4 Abschließende Bemerkungen

Aus der unüberschaubaren Fülle organismischer Angepasstheiten haben wir für diese Studie einige wenige Beispiele ausgewählt, um die Parallelität sinnvoller Problemlösungen bei Mensch, Tier und Pflanze aufzuzeigen. Sie stammen aus der Technik und Architektur sowie aus der Verhaltensweise. Ein optimales Funktionieren bei gleichzeitig realisierbarem (möglichst geringem) Aufwand haben wir einer intelligenten Vorgehensweise gleichgesetzt. Daraus ergibt sich ein intelligentes Produkt. Der Begriff „Intelligenz“ suggeriert zunächst eine ausschließlich auf den Menschen bezogene Wesensart. Vielfach ist man versucht, die menschliche Intelligenz mit Hilfe von Tests zu messen. Oft beinhalten diese eine lange Latte von Intelligenzfaktoren, aus deren Gesamtheit der Intelligenzquotient ermittelt wird. Berücksichtigung findet natürlich das Alter des Menschen. Ein Altersvergleich eröffnet interessante Aspekte der Intelligenzentwicklung bzw. -veränderung bezogen auf ein Einzelindividuum. Bei der Ermittlung einer allgemeinen Intelligenz besteht allerdings die Gefahr einer essentialistischen Vorgehensweise. Diese mündet quasi in eine Normierung. Nun lässt sich aber der Mensch nicht in eine Norm bzw. in einen Typus pressen. Alle Individuen des „Säugetiers“ *Homo sapiens* sind wie alle Individuen einer Tier- oder Pflanzen-Art – wenn man von einer Klonierung, die gang und gäbe bei den Pflanzen ist, absieht – Unikate. Es liegt auf der Hand, dass sich in einem solchen Unikat Fähigkeiten und Unfähigkeiten in unterschiedlichsten Mischungsverhältnissen präsentieren. Ein gutes räumliches Vorstellungsvermögen – in den Intelligenztests öfters abgefragt – hilft einem Philosophen aus dem Labyrinth der Widersprüchlichkeiten innerhalb der Ethik kaum

heraus. Wohl aber werden Chirurgen oder Techniker oder Biologen, die sich mit der Morphologie und Anatomie beschäftigen, bei all ihrem Tun vom angeborenen oder erlernten Zurechtfinden in Raum und Zeit profitieren.

Die Intelligenz ist beim Menschen nicht von heute auf morgen entstanden, sondern in einem evolutiven Prozess Schritt für Schritt. Es hat wohl mit der Fähigkeit zu lernen begonnen, was unabhängig auch in anderen Tiergruppen zu beobachten ist. Man denke etwa an die Lernfähigkeit bei Raben und Krähen (z. B. Taylor et al. 2012, Uomini et al. 2020). Im Kontext der Evolution ist alles, was der Mensch zu schaffen vermag, ein Resultat der Organismischen Evolution, unterworfen dem intelligenten Spiel mit Zufällen und Auslese. Evolution selbst kennt keine Ethik. Letztere ist dem Menschen in seinem „Sichselbstbewusstwerden“ und dem Bewusstsein, dass er als Zoon politikon (Aristoteles) auf der Erde weilt, eigen. Zufall und Optimierung durch Selektion unter dem Diktat des Ökonomischen Prinzips (Optimierungsprinzip), das unerbittliche Konkurrenz auslöst, lässt sich auch – wenn man es will! – als „Schöpfungsstrategie“ bezeichnen. Wenn man es will!, kann man sich über die Attribute eines „Schöpfers“ Gedanken machen. Das wollen wir aber intelligenten Theologen und Religionswissenschaftlern, falls sie es wollen, überlassen.

Literatur

- Barthlott, W. & Ehler, N. 1977: Raster-Elektronenmikroskopie der Epidermisoberflächen von Spermatophyten. – Tropische und subtropische Pflanzenwelt **19**: 367–467.
- Barthlott, W. & Neinhuis, C. 1997: Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces. – Planta **202**: 1–8.
- Bellmann, H. 2010: Der Kosmos Spinnenführer. – Stuttgart: Franckh-Kosmos Verlag.
- Blattner, F. & Kadereit, J.W. 1991: Patterns of seed dispersal in two species of *Papaver L.* under near-natural conditions. – Flora **185**: 55–64.
- Bowling, A.J. & Vaughn, K.C. 2008: Structural and immunocytochemical characterization of the adhesive tendril of Virginia creeper (*Parthenocissus quinquefolia* [L.] Planch.). – Protoplasma **232**: 153–163.
- Culjak, A. 2014: Organisation und Devianz - Eine empirische Fallrekonstruktion der Havarie der Costa Concordia. – Wiesbaden: Springer VS.
- Dafni, A. 1984: Mimicry and deception in pollination. – Annu. Rev. Ecol. Syst. **15**: 259–278.

- Darwin, C. 1859: On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life. – London: J. Murray.
- Erbar, C. 2017: Falsche Versprechen: Lug und Trug in der Blütenwelt. – Ruperto Carola **11**: 120–127.
- Erbar, C. & Leins, P. 2018: Wie mobil sind Pflanzen? – HDJBO **3**: 21–50. <https://doi.org/10.17885/heiup.hdjbo.2018.0.23818>.
- Erbar, C. & Leins, P. 2020: Entwicklungen in der Entwicklung – Fortwährende Veränderungen im Fluss der Organismenwelt. – HDJBO **5**: 1–45. <https://doi.org/10.17885/heiup.hdjbo.2020.0.24182>.
- Erbar, C., Heiler, A. & Leins, P. 2017: Nectaries in fly-deceptive pitcher-trap blossoms of *Aristolochia*. – Flora **232**: 128–141.
- Francé, R.H. 1920: Die Pflanze als Erfinder. – Stuttgart: Franckh'sche Verlagshandlung.
- Henkel, K. 1997: Die Renaissance des Raoul Heinrich Francé. – Mikrokosmos **86**: 3–16.
- Kadereit, J.W. & Leins, P. 1988: A wind tunnel experiment on seed dispersal in *Papaver* L. sects. Argemone Spach and Rhoeodium Spach (Papaveraceae). – Flora **181**: 189–203.
- Lengerken, A. von 1885a: Die Bildung der Haftballen an den Ranken einiger Arten der Gattung *Ampelopsis*. – Dissertation Univ. Göttingen.
- Lengerken, A. von 1885b: Die Bildung der Haftballen an den Ranken einiger Arten der Gattung *Ampelopsis*. – Bot. Zeitung **43**: 337–346, 353–361, 369–379, 385–393, 401–410, Taf. IV.
- Leins, P. & Erbar, C. 2008: Blüte und Frucht. Morphologie, Entwicklungsgeschichte, Phylogenie, Funktion und Ökologie. 2. Aufl. – Stuttgart: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.
- Leins, P. & Erbar, C. 2010: Flower and Fruit. Morphology, Ontogeny, Phylogeny, Function and Ecology. – Stuttgart: Schweizerbart Science Publishers.
- Leins, P. & Erbar, C. 2017: Bäume und Sträucher in Herbst und Winter erkennen. Bebilderte Steckbriefe, Wissenswertes zu Namen, Mythologie und Verwendung. 2. Auflage. – Stuttgart: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.
- Leins, P. & Erbar, C. 2018: Bäume und Sträucher in Frühjahr und Sommer erkennen. Bebilderte Steckbriefe und allerlei Begleitgeschichten aus Biologie, Mythologie und Verwendbarkeit. – Stuttgart: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.
- Lunau, K. 2011: Warnen, Tarnen, Täuschen. – Darmstadt: WBG.
- Mabberley, D.J. 2008: Mabberley's Plant-book. 3rd ed. – Cambridge: Univ. Press.

- Melzer, B., Steinbrecher, T., Seidel, R., Kraft, O., Schwaiger, R. & Speck, T. 2010: The attachment strategy of English ivy: a complex mechanism acting on several hierarchical levels. – J. R. Soc. Interface **7**: 1383–1389.
- Nachtigall, W. 1997: Vorbild Natur: Bionik-Design für funktionelles Gestalten. – Berlin & Heidelberg: Springer-Verlag.
- Nachtigall, W. 2007: Natur macht erfängerisch. Das Ravensburger Buch der Bionik. – Ravensburg: Ravensburger Verlag.
- Nachtigall, W. 2008: Bionik. Lernen von der Natur. – München: Beck.
- Nachtigall, W. & Blüchel, K.G. 2000: Das große Buch der Bionik. Neue Technologien nach dem Vorbild der Natur. – München: Deutsche Verlags-Anstalt.
- Paulus, H.F. 2007: Wie Insekten-Männchen von Orchideenblüten getäuscht werden - Bestäubungstricks und Evolution in der mediteranen Ragwurzgattung *Ophrys*. – Denisia **20**: 255–294.
- Paulus H.F. & Gack, C. 1980: Beobachtungen und Untersuchungen zur Bestäubungsbiologie südspanischer *Ophrys*-Arten. – Jahresb. Naturw. Vereins Wuppertal **33**: 55–68.
- Paulus H.F. & C. Gack 1981: Neue Beobachtungen zur Bestäubung von *Ophrys* (Orchidaceae) in Südspanien, unter besonderer Berücksichtigung des Formenkreises *Ophrys fusca* agg. – Plant Syst. Evol. **137**: 241–258.
- Pfadenhauer, J.S. & Klötzli, F.A. 2014: Vegetation der Erde: Grundlagen, Ökologie, Verbreitung. – Berlin & Heidelberg: Springer Spektrum.
- Spalding, E.S. 1905: Mechanical adjustment of the Sahuaro (*Cereus giganteus*) to varying quantities of stored water. – Bull. Torrey Bot. Club **32**: 57–68.
- Speck, T. 2011: Intelligente Kleber nach dem Vorbild der Natur. – <https://www.bioe-konomie-bw.de/de/fachbeitrag/aktuell/intelligente-kleber-nach-dem-vorbild-der-natur/>.
- Sprengel, C.K. 1793: Das entdeckte Geheimnis der Natur im Bau und in der Befruchtung der Blumen. – Berlin: Vieweg.
- Steinbrecher, T., Beuchle, G., Melzer, B., Speck, T., Kraft, O. & Schwaiger, R. 2011: Structural development and morphology of the attachment system of *Parthenocissus tricuspidata*. – Int. J. Plant Sci. **172**: 1120–1129.
- Taylor, A.H., Miller, R. & Gray, R.D. 2012: New Caledonian crows reason about hidden causal agents. – Proc. Natl. Acad. Sci. **109**: 16389–16391.
- Uomini, N., Fairlie, J., Gray, R.D. & Griesser, M. 2020: Extended parenting and the evolution of cognition. – Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci. **375**: 20190495. <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0495>.

- Vallin, A., Jakobsson, S., Lind, J. & Wiklund, C. 2005: Prey survival by predator intimidation: an experimental study of peacock butterfly defence against blue tits. – Proc. R. Soc. B. **272**: 1203–1207.
- Vogel, S. 1965: Kesselfallen-Blumen. – Umschau **65**: 12–17.
- Vogel, S. 1975: Mutualismus und Parasitismus in der Nutzung von Pollenträgern. – Verh. Deutsch. Zool. Ges. **68**: 102–110.
- Vogel, S. 1978: Pilzmückenblumen als Pilzmimeten. – Flora **167**: 329–398.
- Vogel, S. 1993: Betrug bei Pflanzen: Die Täuschblumen. – Abhandl. Akad. Wiss. Lit. Mainz, math.-nat. Kl. **1993/1**: 1–48.
- Walter, H. 1973: Die Vegetation der Erde in öko-physiologischer Betrachtung. Bd. I: Die tropischen und subtropischen Zonen. 3. Aufl. – Stuttgart: G. Fischer Verlag.
- Walter, H. & Breckle, S.W. 1984: Ökologie der Erde. Bd.2: Spezielle Ökologie der Tropischen und Subtropischen Zonen. – Stuttgart: Fischer, UTB Große Reihe.

Bildnachweise aus dem Internet

Abb. 17d: Roberto Vongher, Wikimedia Commons - Eigenes Werk, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=18045701>.

Abb. 18c: <https://www.businesstraveller.de/hotel/hippe-hallen-die-zehn-spektakulaersten-hotel-lobbys-der-welt/>.

Abb. 19e: <https://images.meetingsbooker.com/images/venues/e14b8357b8dc49afb81241737.jpg>.

Abb. 19f: <https://images.meetingsbooker.com/images/venues/9cfef753c189d4d868c60fb0f2.jpg>.

Wir danken der Royal Society, London, für die freundliche Erlaubnis die Abbildungen 2a (hier: Abb. 10g) und 3a (hier: Abb. 10h) aus der Publikation von Melzer et al. 2010, erschienen im „Journal of the Royal Society Interface“ zu benutzen.

Über die Autoren

Claudia Erbar wurde nach ihrem Biologie- und Chemiestudium, das sie mit dem 1. Staatsexamen in beiden Fächern abschloss, an der Universität Bonn zum Dr. rer.nat. promoviert. Für ihre Staatsexamensarbeit erhielt sie den Preis der Konrad-Adenauer-Stiftung für Studierende der Botanik. Seit 1983 ist sie Wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Universität Heidelberg. Nach der Habilitation im Fach Botanik 1993 hat sie seit 2000 eine apl. Professur und ist heute Forschungsgruppenleiterin für das Gebiet „Blütenbiologie und Evolution“ am Centre for Organismal Studies (COS) Heidelberg. Ihre Forschungsschwerpunkte liegen in den Bereichen der Blütenentwicklungsgeschichte vor dem Hintergrund morphologisch-funktioneller Fragestellungen, Blütenökologie (Blütenfunktionen bei Bestäubung und Befruchtung und der Interaktion mit Insekten) und Verwandtschaft und Evolution der Blütenpflanzen. In der Lehre vertritt sie auch die Pflanzengeographie.

Peter Leins studierte Biologie, Chemie und Philosophie an den Universitäten Tübingen, Freiburg und München. In München wurde er zum Dr. rer.nat. promoviert. Anschließend war er Assistent, später Oberassistent, am Institut für Systematische Botanik bei Prof. Dr. Hermann Merxmüller. Zwischendurch erlernte er die Methodik der Pollenkunde bei Prof. Dr. Gunnar Erdtman in Stockholm. Er habilitierte sich im Fach Botanik mit einer pollensystematischen Forschungsarbeit an einer Compositengruppe. Danach erhielt er einen Ruf auf eine Professur am Botanischen Institut der Universität Bonn. Drei weitere Rufe folgten: FU Berlin, Uni Heidelberg, Uni Kiel (FU Berlin und Uni Kiel nicht angenommen). An der Universität Heidelberg war er zunächst Direktor des Instituts für Systematische Botanik und Pflanzengeographie und des Botanischen Gartens (später Abteilung Biodiversität und Pflanzensystematik des neu gegründeten Heidelberger Instituts für Pflanzenwissenschaften). Seit 2002 ist er im forschenden und lehrenden „Ruhestand“. Seine Forschungsschwerpunkte liegen in den Bereichen der Blütenmorphologie und -entwicklungsgeschichte, Blütenökologie, Blütenpflanzensystematik, Pollenkunde, Ausbreitungsbiologie, Evolutionsbiologie und Biophilosophie.

Korrespondenzadresse:

Prof. Dr. Claudia Erbar, Prof. Dr. Peter Leins
Universität Heidelberg
COS-Biodiversität und Pflanzensystematik
Im Neuenheimer Feld 345
69120 Heidelberg, Germany

E-Mail: erle@urz.uni-heidelberg.de

Homepages:

<http://www.cos.uni-heidelberg.de/index.php/c.erbar?l=>

<http://www.cos.uni-heidelberg.de/index.php/p.leins?l=>