


STEFANO MANCUSO
ALESSANDRA VIOLA

DIE
INTELLIGENZ
DER
PFLANZEN

KUNSTMANN





Ohne die Pflanzen, die uns mit Nahrung, Energie und Sauerstoff versorgen, könnten wir Menschen auf der Erde nicht einmal Wochen überleben. Merkwürdig eigentlich, dass sie trotzdem lange als Lebewesen niederer Ordnung galten, knapp oberhalb der unbelebten Welt. Erst seit kurzem erkennt die Forschung, was schon Darwin vermutete: dass Pflanzen trotz ihrer (scheinbaren) Unbeweglichkeit über stupende Fähigkeiten verfügen, ja über Intelligenz.

Denn außer den fünf Sinnen des Menschen besitzen sie noch mindestens 15 weitere, mit denen sie nicht nur elektromagnetische Felder erspüren und die Schwerkraft berechnen, sondern zahlreiche chemische Stoffe ihrer Umwelt analysieren können. Mit Duftstoffen warnen sie sich vor Fressfeinden oder locken Tiere an, die sie davon befreien; über die Wurzeln bilden sie riesige Netzwerke, in denen Informationen über den Zustand der Umwelt zirkulieren. Ohne Organe können sie so über eine Form von Schwarmintelligenz Strategien entwickeln, die ihr Überleben sichern.

Von wegen »vegetieren«! Ein besseres Verständnis der Intelligenz der Pflanzen könnte uns lehren, auf Pestizide zu verzichten, ja bessere Computer und Netzwerke zu entwickeln, meint der renommierte Pflanzenforscher Stefano Mancuso, der uns in diesem Buch anschaulich und voller Leidenschaft eine unbekanntere Welt eröffnet.

Falle. Das funktioniert aber nur so lange, wie die Kanneninnenwände penibel sauber und glatt sind. Sobald sich Rückstände oder Staubpartikel an den Wänden absetzen, finden die Opfer Halt und suchen das Weite. Und hier kommen die *Camponotus*-Ameisen ins Spiel. Gegen ein wenig Nektar halten sie die Fallen nicht nur sauber, sondern rein. Scheinbar sind sogar die furchtbarsten »Tötungsmaschinen« der Welt auf Freunde angewiesen!

FÜNFTES KAPITEL

Die Intelligenz der Pflanzen

IN DER BIOLOGIE GELTEN DIE ARTEN als herrschend, die sich im Kampf aller gegen alle mehr Lebensraum erobern können, weil sie sich ihrer Umwelt besser anpassen und ihre Probleme im alltäglichen Daseinskampf besser lösen als andere. Die These ist in ihrer Aussage klipp und klar: Je weiter verbreitet eine Art ist, desto größer ist ihre Rolle im Ökosystem.

Nehmen wir beispielsweise an, ein entfernter Planet würde zu 99 Prozent von einer bestimmten Lebensform bewohnt. Was müssten wir dann sagen? Richtig. Der Planet wird von dieser Lebensform beherrscht. Kehren wir nun zur Erde zurück. Was sagen wir von der Erde? Sie werde vom Menschen beherrscht. Doch stimmt diese für uns so beruhigende Annahme auch? 99,7 Prozent der irdischen Biomasse, also der gesamten Masse aller Lebewesen, entfallen nämlich keineswegs auf den Menschen, sondern auf Pflanzen – schätzungsweise, die Angaben schwanken zwischen 99,5 und 99,9 Prozent, wir haben einfach das Mittel genommen. Der Anteil der Gattung Mensch beträgt also – zusammen mit allen anderen Tieren – gerade einmal 0,3 Prozent.

Angesichts der Faktenlage können wir die Erde zweifellos als den grünen Planeten bezeichnen. Das Ökosystem der Erde wird unbestreitbar von den Pflanzen beherrscht. Aber irgendetwas stimmt hier doch nicht. Wieso konnten sich ausgerechnet die dümmsten, passivsten Lebewesen zum Herrscher der Erde aufschwingen? Haben wir nicht eben gesagt, mehr Lebensraum zeuge von einer bes-

seren Anpassungs- und Problemlösungsfähigkeit? Wieso entfallen dann nur 0,3 Prozent der Masse alles Lebendigen (nicht der Anzahl ihrer Arten, wohlgeachtet) auf Tiere und ein noch geringerer Prozentsatz auf den Menschen? Oder besser gesagt: Wie verträgt sich diese Zahl mit der, allerdings nur allzu menschlichen Anmaßung, dass wir die Herrscher der Erde seien und uns mehr Rechte zuständen als allen anderen? Wenn unsere menschliche Existenz nicht so unmittelbar davon berührt würde und es stattdessen um eine objektive wissenschaftliche Studie ginge, fiel uns die simple Antwort wohl leichter: Die Biomasse auf der Erde besteht nur zu 0,3 Prozent aus tierischem und zu 99,7 Prozent aus pflanzlichem Leben? Dann sind Pflanzen wohl die herrschenden Lebewesen, weil sich die Anwesenheit von Tieren ja nur in Spuren nachweisen lässt. Und dafür gibt es nur eine mögliche Erklärung: Pflanzen sind raffinerter, anpassungsfähiger und intelligenter, als wir denken.

Gibt es »pflanzliche Intelligenz«?

Warum wirkt der Begriff »Intelligenz« bloß so fehl am Platz, wenn wir ihn auf das Pflanzenreich anwenden? Bevor wir diese Frage klären, müssen wir uns noch mal vergegenwärtigen, in welchem Maße unsere Gedankenwelt und unsere Einstellung gegenüber Pflanzen seit Jahrtausenden von Vorurteilen und falschen Annahmen geprägt sind. Gehen wir doch noch einmal einige der uns inzwischen bekannten Argumente durch, die für eine »pflanzliche Intelligenz« sprechen.

Weil Pflanzen im Gegensatz zu Tieren sesshaft und meistens im Boden verankert sind, haben sie im Laufe der Evolution spezifische Ernährungs-, Vermehrungs- und Verteidigungsformen entwickelt. Um sich besser gegen Feinde zu wappnen, haben sie beispielsweise einen modularen Körperbau ausgebildet. Die unzähligen Schädlinge, die regelmäßig über Blätter und Stamm herfallen, stellen für sie

deshalb kein ernstes Problem dar. Pflanzen besitzen keine spezifischen Organe wie Gehirn, Herz, Lunge oder Magen, weil Pflanzenschädlinge diese leicht verletzen oder zerstören könnten und in diesem Falle der gesamte Organismus zum Sterben verurteilt wäre. Weil Pflanzen aus redundanten, repetitiven Modulen bestehen, die interagieren und unter bestimmten Bedingungen sogar eigenständig weiterleben, ist kein Teil der Pflanze unbedingt lebensnotwendig. Das ist der prinzipielle Unterschied zum Tier: Pflanzen sind eher eine Kolonie als ein Individuum.

Weil der Aufbau der Pflanzen von unserem grundlegend verschieden ist, erscheinen sie uns als so andersartig und fremd, dass wir in ihnen manchmal nicht einmal Lebewesen sehen. Wir fühlen uns den Tieren, die wie wir Gehirn, Herz, Mund, Lunge oder Magen besitzen, nicht nur näher, sondern verstehen sie auch besser. Bei den Pflanzen ist alles anders. Wie kann ihr Kreislauf funktionieren, wenn sie doch kein Herz besitzen? Können sie überhaupt ohne Lungen atmen? Wieso nehmen sie Nahrung auf, wenn sie keinen Mund haben? Und wie verdauen sie ohne Magen? Doch Pflanzen halten, wie wir gesehen haben, für all diese Probleme eine passende Lösung bereit. Sie benötigen keine spezifischen Organe, die bestimmte Funktionen steuern oder durchführen. Und nun fragen wir: Wie können sie Denkvermögen besitzen, wenn ihnen ein Gehirn fehlt?

Genau aus diesem Zweifel erwächst nämlich das Vorurteil Nummer eins, das wir hinsichtlich der pflanzlichen Intelligenz hegen. Wie sollen Pflanzen eine Funktion ausführen, wenn sie nicht über das entsprechende Organ verfügen? Doch Pflanzen können sich ohne Mund ernähren und ohne Lungen atmen, wie wir gesehen haben. Sie sehen, schmecken, hören, kommunizieren und bewegen sich, obwohl ihnen die spezifischen Organe fehlen. Warum zweifeln wir dann daran, dass sie Denkvermögen besitzen? Dass Pflanzen sich ernähren oder atmen, wird niemand in Abrede stellen. Warum stößt dann die Annahme, dass sie intelligent seien, auf

so großen Widerstand? An dieser Stelle sollten wir vielleicht noch einmal einen Schritt zurück gehen und uns fragen: Was ist Intelligenz überhaupt? Intelligenz ist ja ein weites Feld und schwer zu fassen. Kein Wunder, dass sie völlig unterschiedlich definiert wird – und die treffendste Definition besagt, »dass es so viele Definitionen von Intelligenz gibt wie Forscher, die man danach fragt«.

Als Erstes müssen wir uns also für eine Definition von Intelligenz entscheiden, die für unsere Betrachtung geeignet ist. Infrage käme etwa eine eher weit gefasste Definition: »Intelligenz ist die Fähigkeit zur Problemlösung.« Dies ist wohlgermerkt nicht die einzig dienliche, doch halten wir uns zunächst einfach an sie. Eine interessante Alternative definiert Intelligenz übrigens als menschliches Privileg, das an abstraktes Denken und weitere typisch menschliche kognitive Fähigkeiten gebunden sei, während andere Lebewesen andere »Fähigkeiten« besäßen, für die die passende Bezeichnung noch fehle. Klingt vernünftig. Doch stimmt es auch? Welche typisch menschlichen Vorzüge sind denn sonst nirgends zu finden?

Was wir von der künstlichen Intelligenz lernen können

Typische, einzigartige Eigenschaften, die unsere Intelligenz ausmachen, sind schwer zu benennen. Vielleicht kann uns hier ja die Erforschung der künstlichen Intelligenz weiterhelfen, die seit Jahrzehnten das Wesen menschlicher Intelligenz im Vergleich zur Maschine diskutiert. Internationale Experten für künstliche Intelligenz treffen sich Jahr für Jahr, um sich einer besonderen Herausforderung zu stellen: dem »Turing-Test«. Seinen Namen verdankt der Test dem großen Mathematiker und Vater der Informatik, Alan Turing (1912–1954): Er fragte sich im Jahre 1950, ob Maschinen Denkvermögen besitzen, oder besser gesagt, eines Tages besitzen werden, und wenn ja, wie wir das feststellen können.

Statt abenteuerliche Modelle zu entwickeln oder sich in die

Abgründe der Intelligenzdefinition zu begeben, schlug Turing ein scheinbar simples Experiment vor. Man bilde eine Art Jury, deren Mitglieder sich per Computer mit zwei für sie unsichtbaren Gesprächspartnern über ein beliebiges Thema unterhalten. Der eine Gesprächspartner sei ein Mensch, der andere ein Computerprogramm. Die Jurymitglieder haben sodann zu entscheiden, wen sie für den Menschen und wen für die Maschine halten.

Turing bestimmte, dass der Test regelmäßig zu wiederholen sei und das Computerprogramm den Test bestanden habe, wenn es ihm gelungen sei, nach fünf Gesprächsminuten 30 Prozent der Jurymitglieder zu täuschen. Er mutmaßte, dass die Softwareentwickler den Wettkampf zwischen Mensch und Maschine um das Jahr 2000 gewinnen würden. »Dann wird man tatsächlich von denkenden Computern sprechen können.«

Zwar hat bis heute noch kein Computer die 30-Prozent-Marke geknackt, doch der Moment der Niederlage rückt unaufhaltsam näher. Es fehlt nicht mehr viel, dann wird eine Software menschliche Unterhaltung perfekt simulieren können. Aber dürfen wir dann wirklich von denkenden Maschinen sprechen? Laut Turing ja. Und was würde das für den Menschen ändern? Tja, schwer zu sagen.

Nachdem wir uns jahrtausendlang für die Krone der Schöpfung und den Nabel der Welt gehalten haben, wurde unsere Überzeugung in der Neuzeit schwer auf die Probe gestellt. Scheinbar unerschütterliche Gewissheiten gerieten ins Wanken: Zuerst mussten wir das geozentrische Weltbild ad acta legen und einsehen, dass wir auf einem unbedeutenden Planeten leben, der in irgendeiner Galaxie irgendwo im Universum seine Runden dreht. Dann, dass wir den Tieren nicht nur ähneln, sondern sogar von ihnen abstammen. Welch eine Schmach!

Wir haben uns wirklich alle Mühe gegeben, vermeintlich unüberwindbare Barrieren zu errichten und uns vom Rest der Schöpfung abzusetzen: Nur der Mensch verwendet angeblich die Sprache (falsch), syntaktische Regeln (falsch) oder Werkzeuge (auch falsch,

sogar Kraken können das). Früher waren wir wenigstens die Einzigen, die komplexe mathematische Berechnungen durchführen konnten, heute können wir es nicht einmal mehr mit einem billigen Taschenrechner aufnehmen. Im Laufe der letzten Jahrhunderte sahen wir uns langsam, aber sicher zum Rückzug gezwungen. Wohin das noch führen wird, ist nicht abzusehen, aber die Folgen sind schon heute sichtbar. Was bedeutet es beispielsweise für uns, wenn Computer über intellektuelle Fähigkeiten verfügen, die wir einst für unser Alleinstellungsmerkmal hielten, oder uns sogar übertrumpfen? Computer schlagen unsere Schachweltmeister und besitzen ein praktisch unbegrenztes, fehlerfreies Gedächtnis; sie treffen Vorhersagen, übersetzen und komponieren sogar – wenn ihre Musik auch nicht genial sein mag. Auf die Erfolge der künstlichen Intelligenz reagieren wir normalerweise mit der trockenen Feststellung, dass diese für sich genommen noch kein Ausdruck von wahrer Intelligenz seien. Doch wenn es so weitergeht, werden wir eines Tages begreifen müssen, dass Maschinen unsere angeblich so einzigartige Intelligenz perfekt nachbilden oder sogar noch verbessern können. Werden wir unsere Niederlage gegenüber den Computern dann nicht eingestehen müssen? Und welches Verhalten wäre in diesem Falle das klügere: unsere Intelligenz zum Bollwerk gegenüber anderen Lebewesen hochzustilisieren oder anzuerkennen, dass sie uns zu einem Mitglied der Gemeinschaft aller im Tier- und Pflanzenreich macht?

Intelligenz trennt nicht, sie verbindet

Wenn Tiere sich Nahrung unter Zuhilfenahme von Werkzeugen beschaffen, Sprache entwickeln, aus einem Labyrinth herausfinden oder andere Probleme lösen, sprechen wir ihnen ohne Weiteres Intelligenz zu. Und was ist mit den Pflanzen? Können sie das nicht auch? Doch, sie machen das sogar ständig. Sie verteidigen sich mit

komplexen Strategien gegen Räuber und holen dazu sogar andere Arten ins Boot, sie lassen sich von vertrauenswürdigen »Kurieren« bei der Bestäubung unterstützen, sie umrunden Hindernisse, sie helfen sich gegenseitig, sie verjagen oder verführen Tiere, sie bewegen sich in Richtung Nahrung, Wasser, Licht oder Sauerstoff.

Warum bloß halten wir Pflanzen nicht für intelligent? Anstatt zu leugnen, was für jeden, der Pflanzen schon einmal wirklich beobachtet hat, offensichtlich ist, sollten wir uns vielleicht besser ihre Problemlösungen anschauen und überlegen, was wir daraus lernen können.

Intelligenz gehört untrennbar zum Leben. Selbst der niederste Einzeller muss darüber verfügen, weil auch er in seinem Daseinskampf fortlaufend vor Problemen steht, die er lösen muss – und die den unseren im Übrigen nicht unähnlich sind. Seien wir doch ehrlich: Hängen nicht auch unsere drängendsten Probleme letztendlich mit Nahrung, Wasser, Unterkunft, Gesellschaft, Verteidigung und Fortpflanzung zusammen? Kein Lebewesen ist ohne Intelligenz denkbar. Diese Tatsache sollte uns aber nicht über die Maßen beunruhigen, denn offenkundig ist der Mensch weit intelligenter als Bakterien oder Algen. Allerdings ist dieser Unterschied, und darauf kommt es an, nur quantitativer und nicht qualitativer Art.

Wenn wir Intelligenz als Problemlösungsfähigkeit definieren, können wir keine künstliche Trennlinie mehr zwischen intelligenten Wesen und Lebewesen ziehen, die auf Umweltreize rein automatisch reagieren.

Wer nun trotz allem weiterhin behaupten will, einige Tiere seien intelligent, andere hingegen nicht, der muss genau bestimmen, wann Intelligenz evolutionsgeschichtlich zum ersten Mal auftrat.

Versuchen wir es. Dass der Mensch intelligent ist, bezweifelt wohl niemand. Was ist mit den Primaten? Dass sie intelligent sind, wurde bewiesen. Und die Hunde? Für sie gilt dasselbe. Katzen? Ja, jeder Katzenbesitzer wird das bestätigen. Sind Mäuse intelligent? Und ob. Und Ameisen? Na klar. Und Kraken? Reptilien? Bienen?

Und Amöben, wenn sie sich aus einem Labyrinth befreien und repetitive Ereignisse vorhersehen können? Ist also überhaupt eine Schwelle erkennbar, ab der wir auf einmal von Intelligenz sprechen müssten, oder ist Intelligenz nicht vielmehr und evolutionsgeschichtlich korrekter etwas, das allem Leben innewohnt? Sonst ständen wir nämlich noch vor anderen kaum lösbaeren Problemen.

Denn wenn Intelligenz erst ab einer bestimmten Schwelle beginnt, dann müssen wir uns auch fragen, ob diese Schwelle unverrückbar, also biologisch determiniert, oder nicht vielmehr kulturell bedingt, also raum- und zeitabhängig ist. Im 19. Jahrhundert hielt schließlich noch kaum jemand Tiere für intelligent. Heute stellt das zumindest kein Wissenschaftler mehr infrage, wenn es um Affen, Hunde oder Vögel geht. Und sogar über die Intelligenz von Bakterien gibt es inzwischen zahlreiche Studien. Warum also keine pflanzliche Intelligenz?

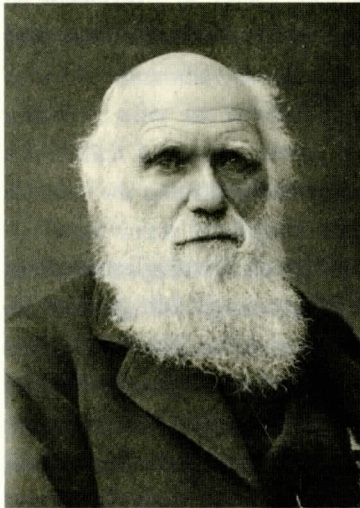
Wie wir gesehen haben, registrieren Pflanzen ununterbrochen zahlreiche Umweltparameter – Licht, Feuchtigkeit, Konzentrationsgefälle, andere anwesende Pflanzen oder Tiere, elektromagnetische Felder, Schwerkraft etc. – und fällen auf dieser Grundlage Entscheidungen in puncto Nahrungssuche, Konkurrenz, Verteidigung, Beziehungen zu anderen Pflanzen und Tieren. Sie nehmen damit komplexe Einschätzungen vor, die eigentlich nur erklärbar sind, wenn sie Intelligenz besitzen. Dass Pflanzen erstaunlich hoch entwickelte Fähigkeiten besitzen, fiel vor über einem Jahrhundert übrigens schon Charles Darwin auf, einem der großen Genies der Menschheitsgeschichte. Damals war die Zeit allerdings noch nicht reif dafür und Darwin überdies vollauf damit beschäftigt, seine später weltberühmte Evolutionstheorie gegen erbitterte Angriffe zu verteidigen. Seine Überlegungen zu diesem Thema vertraute Darwin deshalb seinen botanischen Werken und vor allem seinen Notizbüchern an, deren wissenschaftliche Bedeutung sich erst in letzter Zeit vollständig erschließt. In einem der sechs Bücher, die Darwin der Botanik widmet, verrät er uns besonders viel über seine

Vorstellungen vom Pflanzenreich: *The Power of Movement in Plants* (siehe S. 24 f.). Es enthält als Einziges Versuchsdaten, und allein der Titel ist revolutionär.

Charles Darwin und die pflanzliche Intelligenz

Charles Darwin beschäftigte sich zunächst als Theologiestudent an der Universität Cambridge mit der Pflanzenwelt. Mit großem Interesse verfolgte er die Vorlesungen von John Henslow (1796–1861) – dem er im Übrigen so eng verbunden war, dass er überall als der galt, »der ständig mit Henslow zusammensteckt«. Henslow sollte Darwins Lebensweg entscheidend beeinflussen. Er empfahl ihm dem Kapitän der HMS *Beagle*, Robert FitzRoy, als *Gentlemen Companion*. Und er vermittelte ihm die Grundlagen der Botanik und eine Begeisterung für das Fach, die Darwin sein Leben lang begleiten sollte. In seiner Autobiografie beschrieb Darwin die Begegnung mit Henslow als die folgenreichste seines Lebens. Auch nach Abschluss seiner Studien in Cambridge widmete sich Darwin über Jahrzehnte der Pflanzenwelt und suchte in diesen Geschöpfen, die ihn immer wieder faszinierten, Beweise für seine Evolutionstheorie. Noch in seinen letzten Lebenstagen galt sein Interesse dem Pflanzenreich: In seinem letzten Brief, neun Tage vor seinem Tod, hat ihn eine Pflanze beschäftigt.

Die bahnbrechende Wirkung von Darwins *The Power of Movement in Plants*, das die Geschichte der Botanik verändern sollte, tritt im letzten Absatz des Werks besonders zutage. Wie in vielen anderen seiner Bücher erläutert Darwin dort die grundlegenden Schlussfolgerungen, die er aus seinen Versuchen zieht. Im Zusammenhang mit dem Wurzelwerk hält er fest: »Es ist kaum eine Übertreibung, wenn man sagt, dass die in dieser Weise [mit Empfindungsvermögen] ausgerüstete Spitze des Würzelchens, welche das Vermögen die Bewegungen der benachbarten Theile zu leiten hat,



Charles Darwin:
Der außergewöhnliche Botaniker bewunderte die pflanzlichen Fähigkeiten.

gleich dem Gehirn eines der niederen Thiere wirkt; das Gehirn sitzt innerhalb des vorderen Endes des Kopfes, erhält Eindrücke von den Sinnesorganen und leitet die verschiedenen Bewegungen.«

Auf den übrigen fünfhundert Seiten der grundlegenden Studie beschreibt der geniale Wissenschaftler unzählige Pflanzenbewegungen – wobei drei Viertel des Werks den Wurzeln gewidmet sind. Dass er sich bei seinen Beobachtungen auf die Wurzeln konzentrierte, hat gute Gründe: Das Wurzelverhalten zeigt nicht nur die größten Ähnlichkeiten mit den Bewegungen von Tieren, sondern lässt sich auch beispielhaft mit dem Verhalten anderer Lebewesen vergleichen. In den Wurzeln, oder, besser gesagt, in den Wurzelspitzen, kann man Vorgänge nachweisen, die typischerweise von Intelligenz zeugen: Wurzeln nehmen Umweltreize wahr, entscheiden sich für die einzuschlagende Bewegungsrichtung und führen die Bewegung schließlich aus.

Darwin sieht zwischen dem Gehirn eines Wurmes oder anderen niederen Tiers und der Wurzelspitze keinen wesentlichen Unterschied:

Wir glauben, dass es bei Pflanzen keine wunderbarere Bildung gibt, soweit die Functionen derselben in Betracht kommen, als die Spitze des Würzelchens. Wenn die Spitze unbedeutend gedrückt, gebogen oder geschnitten wird, so leitet sie einen Einfluss auf den oberen, benachbarten Theil über und verursacht, dass sich derselbe von der afficirten Seite wegbiegt; [...] Wenn die Spitze wahrnimmt, dass die Luft auf der einen Seite feuchter ist als auf der anderen, so leitet sie gleichfalls einen Einfluss auf den oberen benachbarten Theil, welcher sich nun nach der Quelle der Feuchtigkeit hinbiegt. Wenn die Spitze durch Licht gereizt wird [...], so biegt sich der benachbarte Theil von dem Lichte ab; wird sie aber durch Gravitation gereizt, so biegt sich derselbe Theil nach dem Mittelpunkt der Schwerkraft hin.

Darwin erkannte in der Wurzelspitze als Erster ein raffiniertes Sinnesorgan, das verschiedene Parameter erfassen und darauf reagieren kann. Und nicht nur das: Als er feststellte, dass die Wurzelspitze Empfindungsvermögen besitzt, ging er davon aus, dass dort die Signale erzeugt werden, die die Wurzelbewegungen steuern. In seinen Versuchen beobachtete er, dass Wurzeln wesentlich an Empfindungsvermögen verlieren, wenn man ihre Spitze entfernt: Sie können keine Schwerkraft mehr wahrnehmen und keine Bodendichte mehr analysieren. Darwin formulierte damit als Erster eine These, die ein Jahrhundert später als *the 'root-brain' hypothesis* bekannt wurde und schließlich den Anstoß zur Erforschung der Wurzelphysiologie gab – eigentlich einem wissenschaftlichen Muss, wenn man bedenkt, welche Bedeutung die Wurzel für das Leben der Pflanze hat.

In der akademischen Welt stieß Darwins These, wie manch andere seiner Ansichten, nicht gerade auf begeisterte Zustimmung. Der erbitterteste Widerstand kam, wie Darwin befürchtet hatte, von deutschen Botanikern: »Ich bereite mit meinem Sohn Francis ein umfangreiches Werk über das Bewegungsvermögen der Pflanzen

vor, das, so denke ich, viele neue Erkenntnisse und Thesen enthält. Ich befürchte, dass unsere Ansicht in Deutschland auf große Ablehnung stoßen wird.«

Die deutsche Ablehnung war weniger wissenschaftlich begründet, sondern speiste sich vor allem aus dem Ärger von Julius Sachs (1832–1897), einem Botaniker, der durch Darwin sein angestammtes Revier bedroht sah. Der hoch geachtete Wissenschaftler betrachtete Darwin als »Dilettanten« – *a country-house experimenter* –, dessen Versuche mit der ernsthaften Arbeit eines Pflanzenphysiologen nichts zu tun hätten.

Nach der Veröffentlichung von *The Power of Movement in Plants* bat Sachs seinen Assistenten Emil Detlefsen, die beschriebenen Versuche zu wiederholen, vor allem die Versuche mit Wurzeln, von denen Darwin die äußerste Spitze, die Wurzelhaube, entfernt hatte.

Natürlich wollte Sachs damit die Schlussfolgerungen widerlegen, die sein britischer Kollege gezogen hatte. Detlefsen machte sich also ans Werk, führte die Versuche aber, wie man später feststellte, höchst mangelhaft durch – unter anderem, weil man seine Arbeit in Sachs' Labor nicht ernst nahm – und kam folglich zu anderen Ergebnissen als Darwin.

Die Antwort von Sachs fiel entsprechend heftig aus. Er beschuldigte Vater und Sohn Darwin, ihre Versuche »dilettantisch« ausgeführt und falsche Ergebnisse präsentiert zu haben. Beide verteidigten ihre Arbeit selbstverständlich.

Der Streit zwischen Sachs und Darwin fand in der akademischen Welt einen gewissen Widerhall. Der renommierte Botaniker Wilhelm Pfeffer (1845–1920), ein ehemaliger Student von Sachs, entschied sich daher, Darwins Versuche ebenfalls zu wiederholen, und kam, von wahren Forschergeist beseelt, zu denselben Ergebnissen wie Darwin. In seinem *Lehrbuch der Pflanzenphysiologie* von 1874 erkannte er Darwins großartige Leistung denn auch neidlos an – während ein zunehmend schmollender Sachs das Buch als »nichts weiter als reichlich unverdaute Fakten« abstempelte.

Heute wissen wir, dass Darwin recht hatte – und die Wurzelspitze sogar noch mehr kann, nämlich zahlreiche physikalisch-chemische Parameter in ihrer Umwelt erkunden und beurteilen (siehe oben, S. 71).

Die intelligente Pflanze

Wir müssen es noch einmal sagen: Pflanzen besitzen kein Gehirn. Und auch wenn wir schon mehrfach darauf hingewiesen haben: Bei Pflanzen gibt es kein Organ, das auch nur im Entferntesten einem Gehirn ähneln würde, wie wir es aus der Tierwelt kennen. Doch müssen wir ihnen darum jede Intelligenz absprechen?

Unserer Vorstellung nach hat die Intelligenz ihren Sitz im Gehirn. Wir nennen jemanden »einen klugen Kopf«, wenn wir ihn für intelligent halten, oder »hirnlos«, wenn wir der gegenteiligen Meinung sind.

Wir verfügen – wie die Tiere, denen wir darum näher stehen und eine gewisse Intelligenz zuerkennen – über ein Gehirn, das in seiner einzigartigen Komplexität und Funktionsweise noch längst nicht erforscht ist. Ohne Gehirn gibt es im Tierreich keine Intelligenz, und damit stellt sich die Frage: Ist das Gehirn für sich genommen schon ein Hort der Intelligenz? Kann man bei einem Gehirn, dem der Körper fehlt, noch von Intelligenz sprechen oder nur von einem beliebigen Zellhaufen? Sind dort noch Spuren von Intelligenz auszumachen?

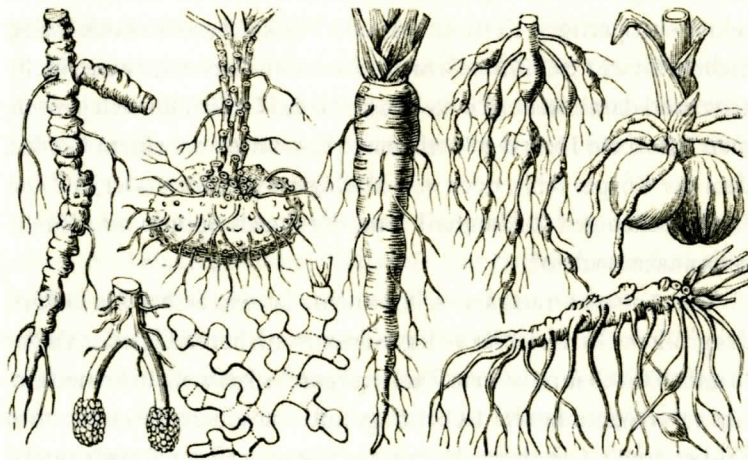
Die Antwort muss zweifellos »nein« lauten. Selbst das Gehirn des größten Genies ist für sich genommen nicht intelligenter als der Magen. Das Gehirn ist kein Zauberorgan, es kann allein keinen einzigen Gedanken fassen. Es benötigt Informationen, die es nur vom Körper erhält und die unabdingbare Voraussetzung für jede intelligente Reaktion sind.

So weit, so gut. Bei Pflanzen sind die Gehirnfunktionen nicht

von anderen Körperfunktionen getrennt, sondern in allen Zellen verfügbar – und ein lebendes Beispiel für das, was in der künstlichen Intelligenz *embodied agent* heißt: Der intelligente virtuelle Agent tritt über einen autonomen Körper mit der Welt in Kontakt.

Wie wir gesehen haben, hat die evolutionäre Entwicklung der Pflanzen zu einem modularen Körperbau geführt, der die pflanzlichen Funktionen nicht in einzelnen Organen konzentriert, sondern im gesamten Organismus verteilt. Durch diese strategische Grundsatzenscheidung ist das Leben der Pflanzen selbst dann nicht bedroht, wenn sie Teile ihres Körpers verlieren. Pflanzen haben keine Lungen, keine Leber, weder Magen noch Bauchspeicheldrüse oder Nieren, können aber trotzdem die Funktionen ausführen, die diese im Tierreich normalerweise übernehmen. Warum sollte es ihnen also an Intelligenz fehlen, nur weil sie kein Gehirn besitzen?

Betrachten wir einmal die Wurzel, die laut Darwin über Entscheidungs- und Steuerungsfähigkeiten verfügt. Die Wurzelspitze, so sagt auch die heutige Wissenschaft, steuert das Wurzelwachstum und die Suche der Pflanze nach Wasser, Sauerstoff und Nährstoffen

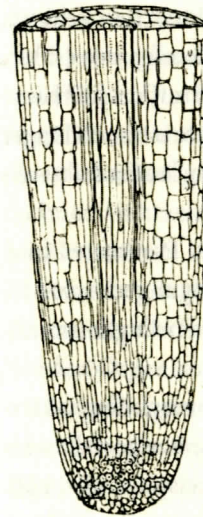


Wurzelwerke: Die Wurzeln bilden den unterirdischen und interessantesten Teil der Pflanze. Die Abbildung zeigt verschiedene Wurzeltypen.

im Boden. Denkbar wäre nun, dass das Wachstum der Wurzel nach automatischen Regeln verläuft und durch einfache Befehle gesteuert wird, etwa »Nach Wasser suchen!« oder »Nach unten wachsen!«. Die Aufgabe der Wurzel wäre damit relativ einfach. Sie müsste Wasser aufspüren und in die entsprechende Richtung wachsen – beziehungsweise nach unten, wenn sie sich von der Schwerkraft leiten lässt. Doch in Wahrheit steht die Wurzel vor einer entschieden komplexeren Aufgabe. Sie muss nämlich verschiedene Ziele im Auge behalten und unterschiedliche Bedürfnisse gegeneinander abwägen. Bei der Erkundung des Bodens werden der Wurzelspitze, die die Wurzel lenkt, komplexe Einschätzungen abverlangt.

Sauerstoff, Mineralstoffe, Wasser und Nährstoffe befinden sich normalerweise in unterschiedlichen, teilweise beträchtlich voneinander entfernten Bodenbereichen, und die Wurzel muss daher fortlaufend wichtige Entscheidungen treffen: Soll sie nach rechts in Richtung des dringend benötigten Phosphors wachsen oder besser nach links, wo sie den stets knappen Stickstoff findet? Soll sie sich auf der Suche nach Wasser nach unten entwickeln oder besser nach

oben, wo sie auf bessere Atemluft trifft? Wie kann sie die widersprüchlichen Bedürfnisse in Einklang bringen? Und vergessen wir bei all dem nicht, dass eine Wurzelspitze außerdem Hindernisse umrunden, konkurrierenden Pflanzen ausweichen oder Schädlinge abwehren muss. Und das ist nur der Anfang. Denn neben den lokalen Bedürfnissen muss sie auch noch die globalen Ansprüche der Gesamtpflanze berücksichtigen – die wieder ganz anders aussehen können.



Die Wurzelspitze: Jede Wurzelspitze ist ein raffiniertes Sinnesorgan.

Das sind ziemlich viele Variablen – die noch dazu alle lebenswichtig sind. Wie etwa verhindert eine Pflanze, dass alle Wurzeln auf der Suche nach Wasser in dieselbe Richtung wachsen? Bei einer automatischen Steuerung des Wurzelwachstums wäre dies eine konkrete Gefahr. Doch um diese Frage zu beantworten, müssen wir erst einmal wissen, wie diese wundersame Wurzelspitze aussieht und wie sie funktioniert.

Die Wurzelspitze bildet das Ende der Wurzel. Ihre Größe kann nur wenige Zehntel Millimeter wie bei der Kleinen Ackerschmalwand (*Arabidopsis thaliana*) oder aber einige Millimeter wie beim Mais betragen. Ihre Färbung ist normalerweise weiß. Sie ist der Wurzelteil, der lebt, in die Länge wächst und das größte Empfindungsvermögen besitzt. Sie ist elektrisch überaus aktiv, und dabei stützt sie sich auf ähnliche Aktionspotenziale wie die elektrischen Signale der Neuronen im tierischen Gehirn. Pflanzen besitzen Millionen von Wurzelspitzen. Selbst im Wurzelwerk winziger Pflanzen lassen sich mitunter mehr als fünfzehn Millionen von ihnen ausmachen.

Jede Wurzelspitze spürt fortlaufend zahlreichen Parametern nach: Schwerkraft, Temperatur, Feuchtigkeit, elektrischen Feldern, Licht, Druck, Konzentrationsgefällen, toxischen Stoffen wie Giften und Schwermetallen, Schallschwingungen, Sauerstoff und Kohlendioxid. Klingt beeindruckend, oder? Doch die Liste ist noch längst nicht vollständig, sondern wird von der Forschung laufend aktualisiert. Jahr für Jahr kommen neue Parameter hinzu.

Die Wurzelspitze registriert aufmerksam alle Parameter und steuert die Wurzel, indem sie – unter Berücksichtigung verschiedener lokaler und globaler Instanzen des pflanzlichen Organismus – fortlaufend wahrhafte Berechnungen anstellt.

Automatische Reiz-Reaktions-Schemata könnten den widersprüchlichen Anforderungen, die an die Wurzelspitze gestellt werden, gar nicht gerecht werden. Doch jede Wurzelspitze allein ist schon ein »Datenverarbeitungszentrum« und arbeitet noch dazu

nicht isoliert, sondern in einem Netz aus Millionen anderer Wurzelspitzen, die zur Community des Wurzelwerks gehören.

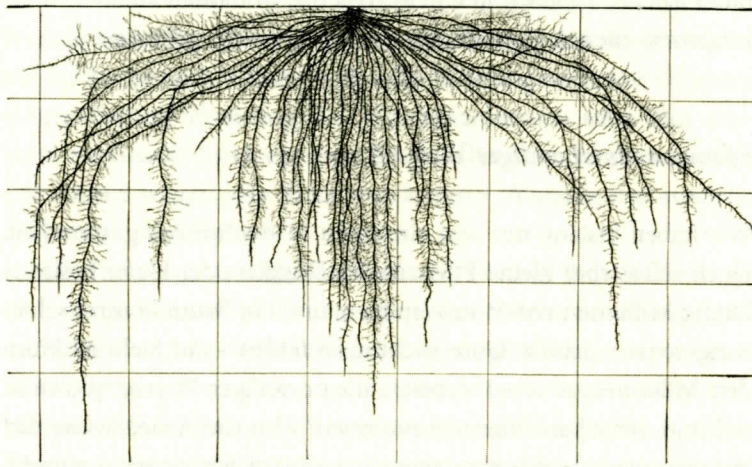
Pflanzen als lebendiges Web 2.0

Wir haben bislang nur von einzelnen Wurzelspitzen gesprochen. Doch selbst eher kleine Pflanzen wie Roggen oder Hafer besitzen häufig Millionen von Wurzelspitzen, und ein Baum kommt schätzungsweise – genaue Untersuchungen fehlen – auf mehrere Hundert Millionen. Aber wie arbeiten die unzähligen Wurzelspitzen in ein und derselben Pflanze zusammen? Um die Arbeitsweise der Wurzelspitzen wirklich zu verstehen, dürfen wir sie nicht einzeln, sondern müssen sie als Knoten in einem kollektiv agierenden Netz betrachten.

Ihr Netz lässt sich am ehesten mit dem Internet vergleichen, dem gewaltigsten Netz, das der Mensch je eronnen hat.

Bei der Lösung hochkomplexer Rechnungen verfolgen die IT-Entwickler seit einigen Jahrzehnten zwei entgegengesetzte Ansätze, die uns hier interessieren: Sie entwickeln einerseits Megarechner, die immer gigantischere Rechenmengen in immer kürzerer Zeit bewältigen: Der IBM-Computer *Sequoia* von 2012 etwa schafft in einer Stunde eine Menge an Rechenoperationen, für die 6,7 Milliarden Menschen 320 Jahre lang rund um die Uhr mit dem Taschenrechner rechnen müssten. Auf der anderen Seite setzen die Entwickler auf die immensen Rechenkapazitäten, die Netze wie das Internet bereitstellen. Offenkundig ähneln die beiden Strategien denen, die die Evolution zur Erhöhung der Rechenleistung in lebenden Organismen gewählt hat: einerseits das spezifische, immer leistungsfähigere Gehirn – der Mensch wäre hier der *Sequoia* –, andererseits die verteilte Intelligenz von Insektenvölkern und eben Pflanzen.

Die enorme Rechengeschwindigkeit von Supercomputern ist



Das Wurzelwerk einer acht Wochen alten Maispflanze. Wurzelwerke bestehen aus Zigmillionen Wurzelspitzen.

zwar von grundlegender Bedeutung und bleibt der von Computernetzen wie dem Internet überlegen, doch die Sicherheit, die nur ein Netz gewährleisten kann, ist auch nicht zu unterschätzen.

Das erste Internet, namens Arpanet, wurde von der DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*, Behörde für moderne Verteidigungsforschungsprojekte) aus Sicherheitsgründen entwickelt: Das Netz sollte selbst einem groß angelegten Atomangriff standhalten können. Der modulare Netzaufbau, so die Überlegung, würde die Datenübertragung auch dann noch sicherstellen, wenn die meisten Computer im Netz zerstört wären. Erinnert Sie das an etwas? Das ist die Strategie der Pflanzen: Millionen von Wurzelspitzen arbeiten in einem Netz zusammen, deshalb können beträchtliche Teile zerstört oder entfernt werden, ohne dass das Netz dadurch in seinem Fortbestand bedroht wäre.

Eine einzelne Wurzelspitze verfügt zwar nur über geringe Kalkulationsfähigkeiten, doch gemeinsam mit anderen ist sie erstaunlich leistungsfähig. Eine Ameise allein entwickelt keine raffinierte

Strategie, aber viele Ameisen errichten einen Staat, mit dem es in puncto Komplexität und Struktur niemand so leicht aufnehmen kann.

Doch wie arbeiten die Wurzeln zusammen? Wie stimmen sie sich ab? Genaues wissen wir nicht, neuere Studien bieten aber überzeugende Hypothesen.

Obwohl das Wurzelwerk die Wurzeln miteinander verbindet, ist das physische Netz offenbar nicht das Entscheidende. Die Signale, mit denen die Wurzelspitzen untereinander kommunizieren, werden aller Wahrscheinlichkeit nicht im Pflanzeninneren weitergeleitet. Wie das?

Dazu müssen wir uns die Wurzelspitzen noch einmal als Insekten in einer Kolonie vorstellen. Selbst die klugen Ameisen sind schließlich nicht miteinander verbunden, handeln aber dank chemischer Signale absolut koordiniert. Vielleicht verhalten sich Wurzeln ja genauso?

Pflanzen sind wahre Meister, wenn es darum geht, chemische Moleküle für alles nur Denkbare zu produzieren. Da kann es nicht verwundern, wenn die unterirdischen – genauso wie die oberirdischen – Pflanzenteile über chemische Signale miteinander kommunizieren.

Allerdings ist all das bisher noch reine Hypothese, und wir sollten daher auch andere Möglichkeiten in Betracht ziehen. Vielleicht reagieren die Wurzelspitzen ja extrem empfindlich auf elektromagnetische Felder, die zwischen benachbarten Wurzeln entstehen, und richten ihr Verhalten danach aus. Oder sie nehmen die Töne wahr, die andere Wurzeln beim Wachsen erzeugen. Wie wir gesehen haben (siehe oben, S. 77), belegen neuere Studien, dass beim Wurzelwachstum Klickgeräusche entstehen. Vorausgesetzt, die benachbarten Wurzelspitzen nehmen die Geräusche wirklich wahr, böte sich hiermit ein überaus praktisches Kommunikationssystem. Da die Töne nicht bewusst erzeugt werden, sondern beim Reißen der wachsenden Zellwände entstehen, würde es sich um ein »parsi-

monisches Signal« handeln, das sein Ziel somit auf sparsame Weise erreicht. Die Pflanze müsste dafür keinerlei gesonderte Mühe oder Energie aufwenden.

Ein Wurzelschwarm

Haben Sie schon einmal einen Vogelschwarm am abendlichen Frühlingshimmel beobachtet? Wenn eine schwarze Wolke aus Tausenden von Vögeln blitzschnell immer wieder neue wunderbare Bilder in den Himmel zeichnet? Noch Ende der Siebzigerjahre war es ein völliges Rätsel, wieso die Vögel im Flug nicht ständig zusammenstießen.

Die Forscher tappten im Dunkeln, und es wurde sogar wissenschaftlich erörtert, ob Vögel telepathische Fähigkeiten besitzen. Wie man vor Kurzem entdeckt hat, war die Erklärung in Wahrheit viel einfacher.

Jeder Vogel im Schwarm befolgt einige wenige Regeln. Er hält beispielsweise einen bestimmten Abstand zum Vogel vor ihm und zu seiner Rechten ein. Auf diese Weise bewegt sich der Schwarm als Ganzes fort – seien es auch Tausende von Vögeln und ihre Formationen noch so waghalsig. Es könnte sein, dass die Evolution dieses elementare wie funktionale Verhalten nicht nur bei Vögeln hervorgebracht hat. Laut einer sehr überzeugenden Theorie verhalten sich Wurzeln wie Schwärme.

Jede Wurzel hält danach einen bestimmten Abstand zu ihren Nachbarwurzeln ein und gewährleistet so ein koordiniertes Wachstum und eine optimale Bodenausnutzung. Ein übergeordneter Wille, etwa ein Gehirn, das die einzelnen Wurzelspitzen steuert, ist daher nicht erforderlich. Laut dieser Theorie haben Pflanzen, weil ihnen ein spezifisches Organ für intellektuelle Aufgaben fehlt, eine ähnliche Form der verteilten Intelligenz entwickelt, wie sie Fischschwärme und viele andere Lebewesen besitzen: Im Schwarm bil-

den Individuen »emergente« Verhaltensweisen aus, über die sie als Einzelne nicht verfügen.

Emergente Eigenschaften wurden in den letzten Jahren systematisch beobachtet und erforscht – mit erstaunlichen Ergebnissen. Sogar bei Menschengruppen entdeckte man emergente Verhaltensweisen: etwa wenn Hunderte von Zuschauern bei einer Theateraufführung klatschen. Wie neuere Forschungen zeigen, ist der Applaus anfangs noch asynchron, jeder klatscht also für sich, dann entwickelt er sich aber in Sekundenschnelle zu einem stetig synchroneren und schließlich harmonischen Klang. Die Synchronisierung, die völlig unbewusst erfolgt, ist das Ergebnis emergenten Verhaltens. Außenstehende könnten sich wundern: Wieso klatschen Hunderte von Menschen gleichzeitig? Wer entscheidet über den Rhythmus? Und woher wissen alle, welchen Rhythmus sie anschlagen müssen?

Zahlreiche menschliche Verhaltensformen erklärt man heute durch emergente Verhaltensmodelle: etwa die Fähigkeit, sich im Getümmel zu bewegen, ohne anderen auf die Füße zu treten, oder die Kursentwicklung an den Börsen. Börsen bestimmen weltweit den Aktienwert von Unternehmen, sie wirken sich auf politische Entscheidungen und individuelle Schicksale aus, aber sie werden nicht zentral gesteuert. Es gibt keine globale Aufsichtsbehörde, die die Kursbewegungen lenkt. Aber die Anleger, die nur eine sehr begrenzte Zahl der Unternehmen in ihrem Portfolio kennen, befolgen bestimmte Regeln. Wie sich die Börse verhält, hängt also allein vom Verhalten der einzelnen Anleger ab. Es ist wie bei den Wurzelspitzen eines Wurzelwerks oder Ameisen in ihrem Staat: Allein sind sie nichts, doch gemeinsam entwickeln sie erstaunliche Fähigkeiten.

Auch in puncto emergentem Verhalten bestehen also beträchtliche Ähnlichkeiten zwischen Pflanzen und Tieren, allerdings mit einem entscheidenden Unterschied. Im Tierreich bestehen Schwärme aus einer großen Anzahl von Individuen: Menschen, Säugetiere, Insekten oder Vögel. Im Pflanzenreich aber spielen sich diese Dy-

namiken in einer einzigen Pflanze ab, in ihrem Wurzelwerk. Jede Pflanze ist also ein Schwarm!

Die Aliens sind unter uns: Pflanzliche Intelligenz als Modell zum Verständnis extraterrestrischer Intelligenz

Über kurz oder lang stößt man bei der Erkundung der pflanzlichen Intelligenz auf einen interessanten Aspekt, der auch einiges über die Intelligenzforschung im Allgemeinen aussagt.

Kommen wir gleich zum Punkt: Bei der Betrachtung pflanzlicher Intelligenz fällt auf, dass der Mensch andere Lebewesen eigentlich nur versteht, solange sie denken wie er. Offensichtlich weiß der Mensch Intelligenz nur zu schätzen, sofern sie der seinen ähnelt.

Das Problem betrifft ebenso die Intelligenz von Organismen, die kein Gehirn besitzen: Bakterien, Protozoen oder Schimmelpilze – von Pflanzen ganz zu schweigen. Wir würden manche Einzeller wie Bakterien und Protozoen ohne Weiteres als intelligent bezeichnen, wenn ihr Verhalten für unser Auge sichtbar wäre und sie vor allem ein Gehirn besäßen. Amöben können sich aus einem Labyrinth befreien, und Schimmelpilze ein Gebiet besser kartieren, als es jede Software vermag. Doch ein gestrenger Richter in unserem Kopf, der sich allerdings mehr auf überlieferte Vorurteile als auf wissenschaftliche Gründe stützt, spricht diesen Organismen, ebenso wie Pflanzen, jede Intelligenz ab. Dabei könnte die Menschheit eines Tages gerade von der Erforschung der pflanzlichen Intelligenz profitieren: weil sie uns lehrt, unser Gehirn mit anderen Augen zu sehen.

Fragen wir uns doch einmal, was passieren würde, wenn wir eines schönen Tages außerirdischer Intelligenz begegnen? Würden wir sie überhaupt erkennen? Von Kommunikation gar nicht zu reden. Wahrscheinlich nicht. Denn offensichtlich kann sich der

Mensch keine andere Intelligenz als seine eigene vorstellen: Er sucht nämlich in den Weiten des Universums weniger nach anderen intelligenten als nach menschenähnlichen Wesen. Doch wenn es wirklich außerirdische Intelligenz geben sollte, dann hat sie sich vermutlich in völlig anderen Organismen entwickelt als unsere, dann hat sie eine andere chemische Zusammensetzung und bewohnt eine Welt, die mit unserer nichts zu tun hat.

Was veranlasst uns überhaupt zu glauben, dass wir sie erkennen würden? Wo wir Intelligenz nicht einmal bei Pflanzen bemerken, mit denen uns eine lange Evolutionsgeschichte, ähnliche Zellstrukturen und vergleichbare Umwelt- und Lebensbedingungen verbinden? Warum sollte etwa ein intelligentes Wesen, das sich auf einem anderen Planeten unter völlig anderen Bedingungen als wir entwickelt hat, Schallwellen zur Kommunikation benutzen? Stimme, Klang, Radio und Fernsehen beruhen auf Wellen, die sich im Raum fortpflanzen. Andere Lebewesen, wie Pflanzen, kommunizieren aber über ganz andere Systeme, wie chemische Moleküle. Doch obwohl zahlreiche Arten auf unserem Planeten diese extrem effiziente Informationsübertragungsmethode nutzen, wissen wir bisher so gut wie nichts darüber.

Weil Pflanzen langsamer reagieren als wir und keine spezifischen Organe besitzen, fällt es uns schwer, ihre Intelligenz zu erkennen. Wie soll es uns da erst mit Wesen gehen, die Lichtjahre von uns entfernt leben? Gerade weil pflanzliche Organismen so anders sind als wir und uns gleichzeitig physisch und genetisch so nahe stehen, könnten sie uns in der Intelligenzforschung als wichtiges Modell dienen und uns darin bestärken, unsere Methoden und Instrumente zur Erforschung der außerirdischen Intelligenz zu überdenken.

Der Schlaf der Pflanzen

Legionen von Philosophen und Forschern haben sich mit dem Schlaf befasst, doch er bleibt der Wissenschaft bis heute ein Rätsel. Aristoteles interessierte sich als einer der Ersten näher für den Schlaf:

Über Schlafen und Wachen gilt es nun, sich Gedanken zu machen, was sie sind, ob sie Eigenschaften der Seele oder des Körpers sind oder ob sie beiden zukommen, und wenn das, welchem Seelen- oder Körperteil sie zukommen, und was die Ursache ist, daß sie bei Lebewesen vorhanden sind. Haben ferner alle Lebewesen teil an Schlafen und Wachen, oder manche nur an dem einen bzw. an dem anderen von beiden, oder manche an keinem, manche an beiden?

Noch zweitausenddreihundert Jahre später sind viele seiner Fragen ungeklärt. Wozu dient der Schlaf? Wie funktionieren Träume, und was sind sie genau? Heraklit von Ephesos (535–475 v. Chr.), ebenfalls ein griechischer Philosoph, schrieb noch vor Aristoteles: »In der Nacht entzündet der Mensch ein Licht für sich selbst.« Jahrtausende später sollte seine Behauptung durch die Psychologie bestätigt werden: Träume bringen unser Unterbewusstes zum Vorschein. Und wie wir heute wissen, ist der Schlaf von großer Bedeutung für Lern- und Rationalisierungsprozesse, also für die edelsten unserer Gehirnfunktionen. Jahrhundertlang nahm die Wissenschaft an, dass allein der Mensch und wenige höhere Tiere schlafen würden, und hielt ähnliche Phänomene bei niederen Tieren oder Pflanzen nicht für »Schlaf«. Die Wissenschaft betrachtete den Schlaf, wie die Intelligenz, also als Alleinstellungsmerkmal des Menschen. Zu Unrecht. Seit Kurzem gesellen sich zur erlesenen Schar der Säugetiere und Vögel, die man des Schlafes schon etwas

länger für würdig hält, sogar die Insekten. Als man im Jahre 2000 entdeckte, dass selbst die Fruchtfliege (*Drosophila melanogaster*) schläft, löste das in der Wissenschaft geradezu ein Erdbeben aus: Wenn sogar so einfache Tiere schlafen, so die Überlegung, dann muss der Schlaf ja wohl grundsätzlich zum Leben gehören.

Aber was ist mit den Pflanzen? Schlafen sie auch? Die Frage mag auf den ersten Blick unerheblich scheinen, doch in den letzten Jahren stößt sie in der Wissenschaft zunehmend auf Interesse. Anders gesagt: Wenn Pflanzen Intelligenz und Denkvermögen besitzen, dann könnte es sein, dass der Schlaf eng mit diesen Aktivitäten in Zusammenhang steht.

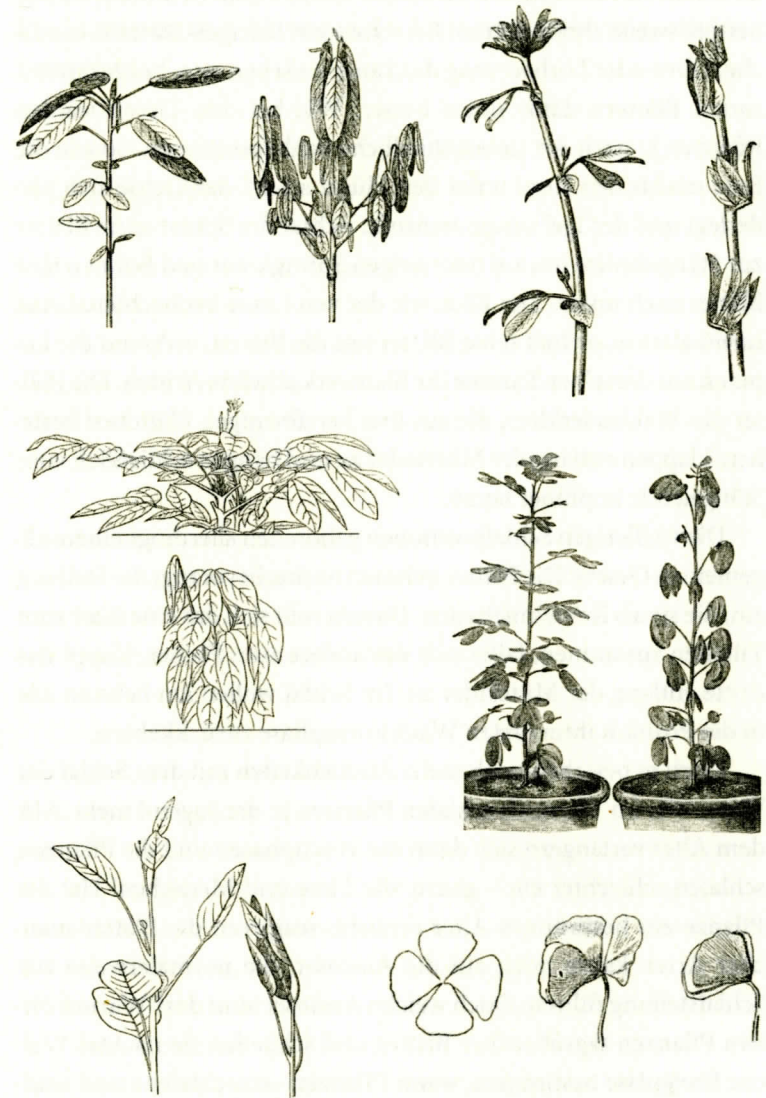
Carl von Linné verfasste 1755, wie wir schon gesehen haben (siehe S. 19), die Abhandlung *Somnus plantarum*, in der er die nächtlichen Blatt- und Stielpositionen mancher Pflanzen beschrieb. Eigentlich hatte alles damit begonnen, dass François Boissier de Sauvages (1706–1767), ein berühmter Botaniker aus Montpellier, ihm zu Forschungszwecken ein Exemplar Hornklee (*Lotus corniculatus*) vermacht hatte.

Die zarte Pflanze benötigte einige Monate, bis sie sich von ihrer weiten Reise vom Mittelmeer ins kühle Uppsala erholt und an die neuen klimatischen Bedingungen gewöhnt hatte. Doch dank Gewächshaus und sorgsamer Pflege entdeckte Linné eines Morgens im Mai an der Pflanze die ersten Blüten. Neugierig kehrte er am späten Nachmittag noch einmal zurück, musste zu seiner großen Überraschung aber feststellen, dass die zarten gelben Blüten, die er nur wenige Stunden zuvor bewundert hatte, verschwunden waren. Was war passiert? Als er die Pflanze am nächsten Morgen erneut besuchte, waren die Blüten wieder da – in alter Frische. Das Geheimnis war bald gelüftet. Linné hatte ein typisches Beispiel von Nyktinastie (von griechisch *núx*, Nacht, und *nastós*, gedrückt) beobachtet, wie die Botaniker heute sagen: die Fähigkeit vieler Pflanzen, Blatt- und Blütenstellung je nach Tages- oder Nachtzeit zu verändern. Linné fand schnell heraus, dass sich die Blätter von *Lotus*

corniculatus bei hereinbrechender Dämmerung nach oben recken, sich um die Blüthengruppen schließen und diese so vor den Blicken Neugieriger schützen – während sich die Stängel gleichzeitig ein wenig neigen und die Stiele zur Erde beugen. Linnés Interesse am »Schlaf der Pflanzen« war geweckt. Später entwickelte er sogar eine Blumenuhr, die die Zeit allein nach dem Verhalten bestimmter Pflanzen maß.

Schon die alten Griechen hatten allerdings beobachtet, dass es bestimmte pflanzliche Bewegungsrhythmen gibt. Androsthene von Thassos, der im Auftrag von Alexander dem Großen reiste, hielt bereits im 4. Jahrhundert v. Chr. fest, dass sich die Blätter der Tamarinde tagsüber öffnen und nachts schließen. Und auch in anderen botanischen Werken aller Zeiten und Länder finden sich ähnliche Beobachtungen. 1260 beschrieb Albertus Magnus (1206–1280) in *De vegetabilibus* (Buch der Pflanzen) die tageszeitabhängigen Blattbewegungen einiger Hülsenfrüchtler, während John Ray (1627–1705) in seinem Werk *Historia plantarum* (Geschichte der Pflanzen; 1686) erstmals von »phytodynamischen« Pflanzenphänomenen sprach, die sich an Tag und Nacht orientieren. 1729 beobachtete Jean-Jacques d'Ortois de Mairan (1678–1771), dass die Mimose ihre Blätter ungefähr im Vierundzwanzigstundenrhythmus öffnet und schließt, und schloss daraus, dass sie eine Art innere Uhr besitzen müsse, die die Blattstellung steuere. Dass Pflanzen schlafen, war vor Linné also schon anderen aufgefallen, doch ihm kommt das große Verdienst zu, das Thema als Erster systematisch behandelt zu haben. Linné erklärt nicht, warum sich Pflanzen so verhalten, erkennt aber intuitiv, dass das Licht und nicht die Temperatur Ursache der veränderten Blattstellung ist. Er klassifiziert im Wesentlichen die Pflanzen, bei denen er dieses Phänomen beobachtet, und nennt die nächtliche Blattstellung den »Schlaf der Pflanzen«.

Anders als so mancher in den letzten Jahren versteht Linné den Schlaf der Pflanzen nicht als Metapher, sondern vergleicht ihn



Blätter in Tag- und Nachtstellung. Von oben, nach links: Telegrafpflanze (*Desmodium gyrans* – *Codariocalyx motorius*), Kreta-Hornklee (*Lotus creticus*), *Senna pubescens*, *Senna corymbosa*, Blaugrüner Tabak (*Nicotiana glauca*), Kleefarn (*Marsilea quadrifoliata*).

durchaus mit dem tierischen Schlaf. Denn Pflanzen ändern nachts beispielsweise ihre Position. Bei Arten mit ledrigen Blättern wie Eiche, Olive oder Lorbeer mag das kaum zu sehen sein, bei Arten mit zarten Blättern dafür umso besser. Wie bei den Tieren wählen Pflanzen je nach Art unterschiedliche Schlafpositionen. So wie die Ente nachts den Kopf unter den Flügel steckt, der Ochse sich niederlegt und der Igel zusammenrollt, richtet der Spinat seine Blätter zur Stängelspitze hin auf oder neigen Springkraut und Bohnen ihre Blätter nach unten. Der Klee, wie der von Linné beobachtete *Lotus corniculatum*, ordnet seine Blätter um die Blüten, während die Lupinen aus derselben Familie ihr Blattwerk abwärts richten. Die Blätter des Waldsauerklees, die aus drei herzförmigen Blättchen bestehen, klappen entlang der Mittelader zu und hängen schließlich vom Stängelende kopfüber herab.

Die vielfältigen Schlafpositionen gehorchen allerdings einem allgemeinen Gesetz: Die Blätter nehmen nachts bevorzugt die Stellung ein, die sie als Keim innehatten. Darum rollt sich das eine Blatt zum Tütchen zusammen, faltet sich das andere zum Fächer, klappt das dritte entlang der Mittelader zu. Im Schlaf wollen am liebsten alle in die Position ihrer ersten Wachstumsphase zurückkehren.

Doch es bestehen noch mehr Ähnlichkeiten mit dem Schlaf der Tiere. Wie im Tierreich schlafen Pflanzen in der Jugend mehr. Mit dem Alter verlängern sich dann die Wachphasen und die Pflanzen schlafen schlechter ein – genau wie Tiere und Menschen! Hat die Pflanze ein bestimmtes Alter erreicht, reagieren die Blätter mancher Arten kaum noch auf die Auslöser, die normalerweise zur Schlafstellung führen. Doch welche Auslöser sind das? Warum öffnen Pflanzen tagsüber ihre Blätter und schließen sie nachts? Welche Ereignisse bestimmen, wann Pflanzen »einschlafen« und »aufwachen«? Auf all diese Fragen gibt es noch keine schlüssigen Antworten. Doch mit dem Fortschritt der Wissenschaft in den kommenden Jahren könnte sich das Pflanzenreich schon bald als überaus nützliches Modell der Schlafforschung erweisen – und als

machtvolles genetisches Instrument, das unser Wissen über die Mechanismen und Störungen des biologisch so wichtigen Schlafs bereichert.

- SERGIO RASMANN ET AL. (2005), »Recruitment of Entomopathogenic Nematodes by Insect-Damaged Maize Roots«, in: *Nature*, 434, S. 732–737.
- CHRISTIANE SCHNEE ET AL. (2006), »A Maize Terpene Synthase Contributes to a Volatile Defense Signal that Attracts Natural Enemies of Maize Herbivores«, in: *PNAS (Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America)*, 103, S. 1129–1134.

Näheres zur Gentechnik, die dem Mais sein ursprüngliches, durch Züchtung verloren gegangenes Verteidigungssystem gegen den Maiswurzelbohrer zurückgegeben hat, siehe:

- JÖRG DEGENHARDT ET AL. (2009), »Restoring a Maize Root Signal that Attracts Insect-Killing Nematodes to Control a Major Pest«, in: *PNAS (Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America)*, 106, S. 13213–13218.

Die Vorstellung, dass Pflanzen nicht nur Tiere, sondern auch den Menschen manipulieren, wird von MICHAEL POLLAN offensiv vertreten und belegt: *The Botany of Desire. A Plant's-Eye View of the World*, New York 2001 (deutsch: *Die Botanik der Begierde. Vier Pflanzen betrachten die Welt*, München 2002).

Zur Verbreitung von Samen durch Fische siehe:

- J. T. ANDERSON ET AL. (2011), »Extremely Long-Distance Seed Dispersal by an Overfished Amazonian Frugivore«, in: *Proceedings of the Royal Society*, B 278, S. 3329–3335.

Hinsichtlich der Kommunikation zwischen fleischfressenden Kannenpflanzen und *Camponotus*-Ameisen weisen wir auf folgenden Artikel hin:

- DANIEL G. THORNHAM ET AL. (2012), »Setting the Trap: Cleaning Behaviour of *Camponotus schmitzi* Ants Increases Long-Term Capture Efficiency of their Pitcher Plant Host, *Nepenthes bicalcarata*«, in: *Functional Ecology*, 26, S. 11–19.

Die Kannenpflanze *Nepenthes raja* auf Borneo pflegt enge Freundschaft mit Ratten. Als Gegenleistung für den Nektar der Pflanze hinterlassen die Ratten Kot in der Falle und verbessern so den Stickstoffhaushalt der Pflanze.

Hierzu empfiehlt sich der Artikel von MELINDA GREENWOOD ET AL. (2011), »Unique Resource Mutualism between the Giant Bornean Pitcher Plant, *Nepenthes raja*, and Members of a Small Mammal Community«, in: *Plos One*, 6(6), e21114.

Fünftes Kapitel

Im Juni 2014 hat die russische Software Eugene Goostman die 30-Prozent-Marke erstmals geknackt und damit den Turing-Test formal bestanden. Allerdings wurden unmittelbar danach Zweifel laut, ob der Computer den Test tatsächlich bestanden habe, da die Versuchsanordnung sehr maschinenfreundlich war: Die Software gab vor, ein 13-jähriger Junge aus der Ukraine zu sein, der nur mangelhaft Englisch spricht. Zudem »redete« er lediglich 2,5 Minuten mit den Juryteilnehmern.

Zum Schlaf der Pflanzen, siehe die bereits im ersten Kapitel zitierten Werke von ARISTOTELES, JEAN-JACQUES D'ORTOUS DE MAIRAN, JOHN RAY und PAUL J. SHAW ET AL.

Über die effizienten Netze von Schimmelpilzen berichten ATSUSHI TERO ET AL. (2010), »Rules for Biologically Inspired Adaptive Network Design«, in: *Science*, 327 (5964), S. 439–442 (DOI:10.1126/science.11778 94).

Wir geben hier das Abstract wieder:

Transportnetze sind in sozialen und biologischen Systemen allgegenwärtig. Alle leistungsfähigen Netze müssen dabei ein komplexes Gleichgewicht zwischen Kosten, Übertragungseffizienz und Fehlertoleranz gewährleisten. Weil sich biologische Netze unter mehrfachem evolutionsgeschichtlichen Selektionsdruck entwickelt haben, ist anzunehmen, dass sie angemessene Lösungen für solche kombinatorischen Optimierungsprobleme gefunden haben. Sie bilden sich zudem ohne Hilfe einer zentralen Steuerungsinstanz und dürften daher im Allgemeinen eine einfach skalierbare Lösung für ständig wachsende Netze bieten. Wir zeigen, dass die Netze des Schleimpilzes *Physarum polycephalum* hinsichtlich Effizienz, Fehlertoleranz und Kosten mit vorhandenen Infrastrukturnetzen, in diesem Falle dem Tokioter Bahnnetz, vergleichbar sind.

Die für die Bildung anpassungsfähiger Netze erforderlichen Grundmechanismen lassen sich in einem von der Biologie inspirierten, mathematischen Modell darstellen, das beim Bau von Netzen in anderen Bereichen von Nutzen sein kann.

Zur Amöbe und ihrer Fähigkeit, sich in Labyrinthen zurechtzufinden, siehe besonders den Beitrag von TOSHIYUKI NAKAGAKI, HIROYASU YAMADA, ÁGOTA TÓTH (2000), »Maze-Solving by an Amoeboid Organism«, in: *Nature*, 407, S. 470 (doi:10.1038/35035159).

Näheres zur Verwendung des Begriffs Intelligenz im Zusammenhang mit Pflanzen, siehe:

- ANTHONY TREWAVAS (2003), »Aspects of Plant Intelligence«, in: *Annals of Botany*, 92 (1), S. 1–20.

Zum Einstieg zitieren wir das Abstract:

Pflanzen gelten normalerweise nicht als intelligent. Dennoch bin ich der Meinung, dass diese Einschätzung lediglich eine Folge ihres sesshaften Lebensstils ist und sich nicht halten lässt, wenn man die pflanzliche Fähigkeit zur Berechnung komplexer Umweltaspekte richtig beurteilt. Der vorliegende, erklärtermaßen provokante Artikel widmet sich zahlreichen Fragen zu diesem Thema. Wendet man den Begriff der Intelligenz auf pflanzliche Verhaltensweisen an, führt dies nicht nur zu einem besseren Verständnis ihres komplexen Signalübertragungssystems und der Unterscheidungs- und Empfindungsfähigkeit, dank derer Pflanzen ein Abbild ihrer Umwelt erzeugen, sondern auch zu der wichtigen Frage, wie Pflanzen ihre Reaktionen berechnen. Ferner berücksichtigen wir mögliche Ansätze, mit denen sich Lernfähigkeit und Erinnerungsvermögen von Pflanzen untersuchen lassen.

In einem weiteren Artikel stellt derselbe Autor die These auf, dass man Pflanzen als »Prototypen intelligenter Organismen« betrachten müsse: ANTHONY TREWAVAS, »Plant Intelligence« (2005), in: *Naturwissenschaften*, 92, S. 401–413 (doi:10.1007/s00114-005-0014-9).

Wir zitieren das Abstract:

Intelligentes Verhalten ist ein komplexes evolutionsgeschichtliches An-

passungsphänomen, das Organismen befähigt, sich auf veränderte Umweltbedingungen einzustellen. Weil die Maximierung der eigenen Stärke erfordert, in Konkurrenzsituationen die notwendigen Ressourcen (Nahrung) zu finden, sind wir von der Annahme ausgegangen, dass intelligentes Verhalten bei dieser Aktivität am ehesten zutage tritt.

Nach Meinung von Biologen gehören zur Intelligenz, also zur Problemlösungsfähigkeit in wiederkehrenden und neuen Situation, eine detaillierte Sinneswahrnehmung, die Fähigkeit zur Informationsverarbeitung, Lernfähigkeit, Erinnerungsvermögen, Entscheidungsfähigkeit, eine Optimierung der Nahrungssuche zu minimalen Kosten, Selbstwahrnehmung und die Fähigkeit, Vorhersagen auf der Basis von Zukunftsmodellen zu treffen. In dem vorliegenden Artikel beleuchte ich Befunde, die zeigen, dass einzelnen Pflanzenarten all diese intelligenten Verhaltensmöglichkeiten zur Verfügung stehen – wobei sie dies durch phänotypische Plastizität und nicht durch Bewegung erreichen. Zudem lassen sich die meisten dieser Eigenschaften beim Konkurrenzkampf um Nahrung nachweisen. Pflanzen müssen daher als Prototypen intelligenter Organismen gelten. Dieses Konzept hat für die Erforschung der pflanzlichen Kommunikations-, Kalkulations- und Signalübertragungsfähigkeiten beträchtliche Folgen.

Zum Thema der pflanzlichen Intelligenz siehe auch:

- PACO CALVO GARZÓN, FRED KEIJZER (2011), »Plants: Adaptive Behaviour, Root-Brains, and Minimal Cognition«, in: *Adaptive Behavior* 19, S. 155 (doi:10.1177/1059712311409446).

Der Artikel spricht von einem »Wurzelgehirn« und Schaltzentralen in der Wurzel und erkennt Pflanzen gewisse kognitive Fähigkeiten zu. Die Autoren schreiben:

Im Zusammenhang mit tierischem und menschlichem Anpassungsverhalten ist die pflanzliche Intelligenz bisher kaum berücksichtigt worden. Vor diesem Hintergrund stellen wir aktuelle Studien zu pflanzlicher Intelligenz und ihren Erscheinungsformen vor, die unsere Aufmerksamkeit verdienen. Ferner diskutieren wir ihr Potenzial, wichtige Erkenntnisse für die allgemeine Erforschung des Anpassungsverhaltens beizutragen. Dazu geben wir zunächst einen kurzen Überblick über das

pflanzliche Anpassungsverhalten, um die These zu verdeutlichen, dass Pflanzen handelnde Wesen sind. Dann beschäftigen wir uns mit der »Pflanzenneurobiologie« und erläutern die wiederentdeckte These von Darwin, dass Pflanzen eine in den Wurzelspitzen verteilte Schaltzentrale besitzen, die ihr Verhalten steuert (Wurzelgehirn). Wir diskutieren minimale Kognitionsformen und halten Bewegungsvermögen und das Vorhandensein einer spezifischen sensorisch-motorischen Struktur dabei für Schlüsselmerkmale minimaler kognitiver Fähigkeiten. Wir kommen zu dem Schluss, dass Pflanzen über minimale kognitive Fähigkeiten verfügen, und diskutieren die Folgen und Herausforderungen, die die pflanzliche Intelligenz für die Anpassungsforschung und die Kognitionswissenschaften im Allgemeinen mit sich bringt.

Am 10. April 1882 schrieb Charles Darwin seinen, soweit wir wissen, letzten Brief. Als wolle er seinem Leben, das von der Leidenschaft für die Botanik geprägt war, einen letzten Stempel aufdrücken, widmet er sich in dem Brief beinahe ausschließlich den Pflanzen. Da der Brief kurz ist, geben wir ihn hier vollständig wieder:

10. April 1882

Sehr geehrter Herr Todd!

Bitte entschuldigen Sie, dass ich mich als völlig Fremder an Sie wende und um einen Gefallen bitte. Mit größter Aufmerksamkeit habe ich Ihren hochinteressanten Artikel über die Blüten von *Solanum rostratum* im *American Naturalist* gelesen. Ich wäre Ihnen äußerst dankbar, wenn Sie mir eine kleine Schachtel mit einigen Samen senden könnten und mir gleichzeitig mitteilen, ob es sich um eine einjährige Pflanze handelt, damit ich weiß, wann ich den Samen setzen kann. So hätte ich die Freude, die Blüten zu erleben, und könnte meine Versuche an ihnen durchführen. Ich möchte mich jedoch in keiner Weise in Ihre Arbeit einmischen. Also schicken Sie mir die Samen bitte nicht, wenn Sie die Versuche selbst durchführen möchten. Ich würde auch gerne die Blüten von *Cassia chamaecrista* sehen. Ich habe vor einigen Jahren entfernt vergleichbare Versuche durchgeführt, und versuche es auch dieses Jahr wieder. Ich habe meine Forschungsarbeiten auch Herrn Dr. Fritz Müller (Blumenau, Santa Catarina, Brasilien) beschrieben, und wie er mir sag-

te, hält er es für wahrscheinlich, dass manche Pflanzen zwei verschiedenfarbige Staubbeutel hervorbringen und die Bienen nur die Pollen des einen sammeln. Er hat daher vermutlich großes Interesse an Ihrem Artikel und würde sich freuen, wenn Sie eine Kopie entbehren und ihm zusenden könnten. Ich meine, aber mein Gedächtnis kann mich täuschen, dass er zu dem Thema einen Artikel in *Kosmos* veröffentlicht hat.

Ich bitte Sie höflichst um Verständnis.

Hochachtungsvoll

Ch. Darwin

p.s.: In meinem Büchlein über die Befruchtung von Orchideen findet sich unter *Mormodes ignea* die Beschreibung einer in der Längsachse asymmetrischen Blüte, die ich, so glaube ich, als rechts- oder linkshändige Blüten bezeichnet habe.

Um sich eine Vorstellung von dem beeindruckend komplexen Wurzelwerk zu machen, siehe:

- HOWARD J. DITTMER (1937), »A Quantitative Study of the Roots and Root Hairs of a Winter Rye Plant (*Secale Cereale*)«, in: *American Journal of Botany*, 24 (7), S. 417–420.

Die Arbeitsweise der Wurzelspitze erläutern FRANTIŠEK BALUŠKA, STEFANO MANCUSO, DIETER VOLKMANN, PETER W. BARLOW (2010), »Root Apex Transition Zone: a Signalling-Response Nexus in the Root«, in: *Trends in Plant Science*, 15 (7), S. 402–408.

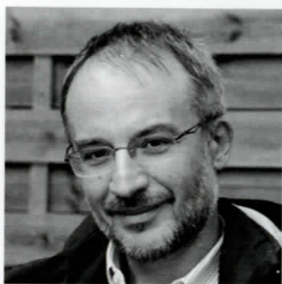
Die elektrische Wurzelaktivität wurde erforscht in: ELISA MASI ET AL. (2009), »Spatiotemporal Dynamics of the Electrical Network Activity in the Root Apex«, in: *PNAS (Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America)*, 106 (10), S. 4048–4053.

Über emergentes Verhalten wurden unzählige, darunter viele grundlegende Bücher geschrieben. Zur Vertiefung dieses wirklich faszinierenden Themas empfehlen wir:

- STEVEN JOHNSON, *Emergence: the Connected Lives of Ants, Brains, Cities, and Software*, New York 2001.
- STEPHEN WOLFRAM, *A New Kind of Science*, Champaign (IL) 2002.

- HAROLD J. MOROWITZ, *The Emergence of Everything: How the World Became Complex*, Oxford 2002.

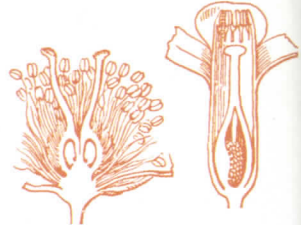
Zum Schwarmverhalten und den emergenten Eigenschaften von Wurzeln siehe: MARZENA CISZAK ET AL. (2012), »Swarming Behavior in the Plant Roots«, in: *Plos One*, 7(1), e 29759 (doi:10.1371/journal.pone.0029759) sowie: FRANTIŠEK BALUŠKA, SIMCHA LEV-YADUN, STEFANO MANCUSO (2010) »Swarm Intelligence in Plant Root«, in: *Trends in Ecology and Evolution*, 25, S. 682–683.



Stefano Mancuso, Professor an der Universität Florenz, leitet das Laboratorio Internazionale di Neurobiologia Vegetale und ist Gründungsmitglied der International Society for Plant Signaling and Behavior. Mit über 250 wissenschaftlichen Publikationen gilt er international als der Spezialist zum Thema. Er sprach 2010 auf der TED-Konferenz, nahm mit Experimenten am europäischen Space-Shuttle-Programm teil und stellt auf der EXPO 2015 in Mailand ein neuartiges Pflanzenkultivierungsprojekt vor.

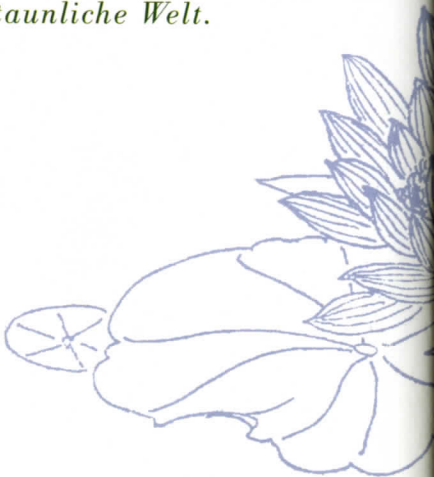
Alessandra Viola ist eine preisgekrönte italienische Wissenschaftsjournalistin, die auch für die RAI Fernsehprogramme entwirft.





Pflanzen versorgen uns nicht nur mit Nahrung, Energie und Sauerstoff, sie haben mehr Sinne als der Mensch. Sie können die Schwerkraft berechnen und chemische Stoffe analysieren, tauschen mit Vögeln und Insekten Informationen aus, und ihr Wurzelwerk bildet eine Art lebendes Web. Anschaulich und voller Leidenschaft erschließt uns der renommierte Pflanzenforscher Stefano Mancuso eine erstaunliche Welt.

SEPS
SEGRETIARIATO EUROPEO PER LE PUBBLICAZIONI SCIENTIFICHE



ISBN 978-3-95614-030-3 | € 19,95 (D)

