Morphologisches Modellieren

Ruth Richter

In der Onlineversion einer Notiz in der Fachzeitschrift «Nature» vom 13. Juli 2017 unter der Rubrik «News» berichtet Heidi Ledford von einem morphologischen Projekt der Arbeitsgruppe um Dan Chitwood am Donald Danforth Plant Science Center in St. Louis, USA. Dazu zitiert sie den Morphologen Yannick Städler von der Universität Wien mit einem sehr zuversichtlichen Blick auf die Zukunft der Pflanzenmorphologie:

> *«Es gab eine Zeit, in der die Bemühungen, die pflanzliche Gestalt zu verstehen auszusterben drohten, aber das Forschungsfeld erfährt eine Renaissance. Anstrengungen, pflanzliche Merkmale zu charakterisieren und zu verstehen, wie Genetik und Umgebungsbedingungen sie beeinflussen, sind weit verbreitet. Die Morphologie wird aktuell neu geboren, sie ist ein Feld, auf das die Biologie zusteuert. Und ich glaube, besonders in Verbindung mit genetischen Daten haben wir eine leuchtende Zukunft.»*
>
> (*Ledford* 2017, Übersetzung RR)

Die Mathematisierung der pflanzlichen Gestalt sieht auch Dan Chitwood als zukunftsträchtiges Anliegen. In der organismischen Morphologie liegt jede Menge Information über die Gene verborgen, die durch die Evolution moduliert worden sind und die spektakuläre Vielfalt der Pflanzen hervorgebracht haben, heisst es auf seiner Website. Das Forschungsprogramm seiner Gruppe zielt auf die Erkundung der Pflanzenmorphologie, ihrer Entwicklung und Plastizität und will innovative Denkmöglichkeiten über die Beschreibung, Quantifizierung und Anwendung von Form-Information in den Pflanzenwissenschaften und darüber hinaus anstossen. Mathematisch könne eine Pflanzengestalt anstatt als Serie von Formen, die sich in der Zeit entwickeln, sogar als eine einzige vierdimensionale Gestalt beschrieben werden.

In einer solchen Vision klingt mathematische Begeisterung an. Doch wie kann eine vierdimensional beschriebene Pflanze, die ja als mathematische Funktion einen blossen Möglichkeitsraum darstellt, zur Erkenntnis von Bezügen zwischen einzelnen, real erscheinenden Pflanzen beitragen?

In einem 2017 erschienenen Artikel macht Chitwood deutlich, dass sein Ziel nicht abstraktes Modellieren ist, sondern dass er einen Beitrag zu den zentralen Fragen der Biologie leisten will. Der Titel «Morphological Plant

Modeling: Unleashing Geometric and Topological Potential within the Plant Sciences» zeigt, dass das Erkenntnispotential, das in den raum-zeitlichen Relationen der Pflanzengestalt liegt, wahrgenommen und adressiert wird.

Die Autorengruppe stellt in Anlehnung an *Kaplan* (2001) die Morphologie als Schnittstelle dar, die alle biologischen Disziplinen verbindet.

> *«Sie kann deskriptiv oder kategorisierend sein, wie etwa in der Systematik, die im Fokus auf Homologien Organismengruppen zu unterscheiden sucht. In der Ökologie definiert die Morphologie von Pflanzengesellschaften Vegetationstypen und Lebensgemeinschaften in ihrer Beziehung zur Umwelt. Umgekehrt fliessen die Ergebnisse von anderen Forschungsfeldern in die Pflanzenmorphologie ein, etwa aus der Physiologie, dem Studium von Funktionen, und aus der Genetik die Beschreibung von Vererbung und die molekularbiologische Darstellung der zugrundeliegenden Genregulation.»*
>
> (*Bucksch et al.* 2017, S. 2, Übersetzung RR)

In der Einleitung des zitierten Artikels wird Goethe als der Pionier erwähnt, der mit seinem «Versuch die Metamorphose der Pflanzen zu erklären» eine neue Perspektive eingeführt hat, wie Mathematiker über Pflanzenmorphologie denken können: Die Idee, dass das Wesen der Pflanzengestalt ein grundlegender, sich wiederholender Prozess der Transformation ist. Die Autoren leiten aus dieser Idee eine zu bearbeitende Aufgabe ab:

> *«Die aktuelle Herausforderung, die sich aus Goethes Paradigma ergibt, liegt darin, Transformationen, wie sie sich aus Unterschieden in den genetischen, entwicklungs- und umgebungsbedingten Reizen ergeben, quantitativ zu beschreiben.»*
>
> (*ebd.* S. 2, Übersetzung RR)

Aus mathematischer Sicht stelle sich das Problem, wie Formdeskriptoren zu definieren sind, um die Eigenschaften der Pflanzengestalt mit topologischen und geometrischen Techniken vergleichbar zu machen, und wie diese Formparameter in Simulationen der Pflanzenentwicklung integriert werden können.

Die aus Goethes Modell abgeleitete Herausforderung hat Dan Chitwoods Arbeitsgruppe zu ihrem Forschungsprogramm gemacht. Die Autoren sehen in dem Schatz an Informationen, die die Pflanzengestalt in ihren geometrischen und zeitlichen Relationen birgt, das Potential, ungelöste Probleme der modernen Biologie anzugehen. Dazu gehört die offene Frage, wie die Vererbung und Aktivität von Genen mit den beobachtbaren Phänotypen in

Verbindung zu bringen sind. Beim Studium der Morphologie sei es besonders problematisch, dass sowohl die genetische Landschaft als auch der Raum möglicher Gestalten hoch komplexe Systeme sind. Beide Phänomenbereiche sind bereits für sich alleine schwierig zu modellieren, umso anspruchsvoller sei der Versuch, die Morphologie als Ergebnis genetischer Vorgänge mathematisch darzustellen. Ausserdem modifizieren die Umgebungsbedingungen im Rahmen der phänotypischen Plastizität einer Art oder Herkunft die spezifische Ausprägung des Phänotyps (*ebd.* S. 7). Noch komplexer wird das Modell dadurch, dass die physiologischen Funktionen der Pflanze durch die Gestaltbildung beeinflusst werden. Indem sich während des Wachstums Topologie und Geometrie der Pflanze kontinuierlich verändern, wird auch die Balance zwischen der Leistung einzelner Organe und der Produktion pflanzlicher Substanz in Mitleidenschaft gezogen (*ebd.* S. 9).

Weil es extrem schwierig ist, komplexe voneinander abhängige Prozesse zu untersuchen, die sich in verschiedenen raumzeitlichen Grössenordnungen abspielen – von der molekularen über die zelluläre bis zur makroskopischen Ebene – sehen die Autoren das mathematische Modellieren als ergänzendes Werkzeug, mit dem zusammengesetzte Prozesse entflochten werden können, um zu untersuchen, wie ihr Zusammenspiel zu emergenten Mustern auf der Ebene des Gesamtsystems führt (*ebd.* S. 7).

Zusamenfassend halten die Autoren fest, dass die pflanzliche Gestalt aus der Sicht sowohl des Molekularbiologen als auch der Mathematikerin ein Mysterium sei, das beide gleichermassen fasziniert. Die Pflanzenmorphologie enthalte das Geheimnis, das hinter den vorherbestimmten Veränderungen organisatorischer Muster steht, die als Ergebnis von evolutionären, entwicklungsbedingten und umgebungsinduzierten Reaktionen entstehen. Das anhaltende Problem an der Schnittstelle zwischen Pflanzenwissenschaften und Mathematik sei wohl die Integration von Messungen in verschiedenen Grössendimensionen der Pflanze. «Wir müssen der Herausforderung gerecht werden, mathematische Modelle zu entwickeln und zu validieren, die die Pflanze über das visuell Sichtbare hinaus beschreiben.» Erst dann könne die Architektur der Pflanze gezielt durch Züchtung verändert werden, um den Bedarf an landwirtschaftlichen Produkten und nachhaltigen Umgebungsverhältnissen für die Menschheit zu decken. Dafür seien eine wissenschaftliche Ausbildung über disziplinäre Grenzen hinweg und eine Öffnung der wissenschaftlichen Gemeinde unabdingbar, sowohl was die Verfügbarkeit von Daten für die Allgemeinheit, als auch den Einbezug von «citizen science», d.h. die Mitarbeit von Laien im wissenschaftlichen Prozess, betrifft (*ebd.* S. 12).

In der Publikation, die Goethe als Pionier des von ihr verfolgten Programms nennt, finden sich einige Gemeinsamkeiten mit der von ihm ange-

regten Wissenschaftsmethode. Der Aufruf der Autoren zu interdisziplinärer Zusammenarbeit in der Erkenntnis des Lebendigen, in der die Morphologie die zentrale und verbindende Wissenschaft ist, spiegelt Goethes Entwurf in den Morphologischen Schriften. Physik, Chemie, Anatomie, Physiologie, Naturgeschichte, kurz: alle Disziplinen seiner Zeit bezeichnete er als Hilfswissenschaften, die sich dem Studium der modifizierenden Bedingungen der Lebewesen und ihrer äusseren Merkmale widmen und der Morphologie ihre Ergebnisse zutragen sollten. Der Morphologe sollte das gesammelte Wissen zu einem grossen Ganzen zusammenfügen.

Gemeinsam mit der in Goethes Zeit aufblühenden empirischen Naturwissenschaft war seiner Methode auch die Abkehr von aus zufälligen oder auch wiederkehrenden beliebigen Beobachtungen abgeleiteten Hypothesen. Die oberste Pflicht des Wissenschaftlers sah er in der systematischen Vervielfältigung von Versuchen, in denen sich der Forschungsgegenstand unter möglichst verschiedenen Bedingungen Ausdruck verschaffen konnte. Seine peinlich genaue Vermessung von Knochen verschiedener Tiere und deren tabellarische Aufstellung, die er bei der Suche nach dem Zwischenkieferknochen beim Menschen machte, wird mit der Erhebung von an Tausenden von Exemplaren einer Art gemessenen Wachstumsdaten folgerichtig expandiert. In der mathematischen Bearbeitung der Daten zum Zwecke des Vergleichs kann eine Verwandlung seines Postulats gesehen werden, die Phänomene folgerichtig in Reihen zu ordnen.

Es ist ein faszinierender Gedanke, an einer grossen Anzahl von Pflanzen, die unter definierten Bedingungen kultiviert werden, während des Wachstums Messungen vorzunehmen und in eine mathematische Funktion zu passen, die ein «Durchschnittsmodell» des Prozesses darstellt. Ihre Graphen können dann das Skelett der immer ähnlichen, aber doch nie gleichen Struktur der Verzweigungsmuster repräsentieren. Informatiker befassen sich damit, eine Grammatik der Muster der geometrischen Veränderungen in der Zeit zu schreiben, anders gesagt: die Regeln des Wachstums als Algorithmus zu fassen, mit dem sich die pflanzliche Entwicklung simulieren lässt. Der berühmte Mathematiker Alan Turing verfolgte die Gesetze der Gestaltbildung mit leidenschaftlichem Interesse. Sein Ansatz war zweigleisig: zunächst erfolgte eine detaillierte geometrische Analyse der Muster, dann wendete er seine Theorie der Morphogenese durch lokale Aktivierung und entfernte Hemmung an, die das erste System für morphologische Modellierung definierte (*ebd.* S. 3). Der Algorithmus fungiert darin als Analogon der in der Pflanze gesetzmässig wirkenden Kräfte, die in der Simulation ins Bild gebracht werden.

Wenn in solchen Modellen ein Raum möglicher Wachstumsmuster aufgespannt wird, liegt der Gedanke an Goethes Ausspruch nahe, er könne mit

seinem Modell der Urpflanze mögliche Pflanzen ins Unendliche erfinden, die – obwohl nie gesehen – doch konsequent sind. Ob er es begrüsst hätte, am Bildschirm mit einem Klick die Wirkung der Variation der Bedingungen betrachten zu können, die er mit der Vermannigfaltigung seiner Versuche postuliert hat?

Turings Theorie, dass Form nur entstehen kann, wenn Kraft auf Widerstand trifft, findet sich nicht nur in Hegels Auseinandersetzung mit dem Problem von Bewusstsein und Gegenstand, sondern auch bei mehreren Naturphilosophen der Goethezeit im Zusammenhang mit der Frage nach der Entstehung der Materie. Menschen, die Simulations-Modelle programmieren, müssen sich tiefgreifend mit den Gesetzen der Gestaltentstehung auseinandersetzen und geraten dabei offensichtlich in erkenntnistheoretische Dimensionen. Sie sind gezwungen, ein weiteres Postulat der Goetheschen Methode unablässig zu üben und zu entwickeln: die Beweglichkeit des Denkens im Pendeln zwischen abgeleiteten begrifflichen Merkmalen und Bedeutungsvergabe. Für jedes mathematische Ergebnis muss immer wieder gefragt werden: Was bedeutet das im Blick auf die Wirklichkeit der Pflanzengestalt? Stimmt die Simulation überein mit dem, was am modellierten Objekt geschieht? Der Verstand begnügt sich dabei nicht mit einer Analyse vorliegender fester Strukturen, sondern richtet sich auf die Abfolge sich verändernder Zustände. Der Blick auf die Reihe der sich entwickelnden Ergebnisse eines Prozesses, kurz: die Genese der Gestalt, bringt die Frage nach der Gesetzmässigkeit mit sich, kraft derer die verschiedenen Zustände auseinander hervorgehen. Die in der Transformation wirkenden Kräfte sollen quantitativ erfasst werden, und wenn ihre Wirkungen in der Simulation sich mit an realen Pflanzen beobachtbaren Wirkungen – aus denen sie ja abgeleitet sind – decken, kann dies den Realitätsbezug des Algorithmus bestätigen. Das ist ein wissenschaftlicher Weg, die Pflanze «über das visuell Sichtbare hinausgehend» zu beschreiben.

Nach der Skizzierung ihrer Visionen und Ziele räumen die Autoren allerdings ein, dass eine Synthese, die umfassend beobachtete biologische Phänomene in einer mathematischen Perspektive verkörpert, bis heute kaum zu fassen ist (*ebd.* S. 4). Wo liegen die Probleme? Es liegt auf der Hand, dass einfache Parameter wie etwa Längenmessungen nur eine einzelne Eigenschaft einer geometrisch und räumlich hoch komplexen Struktur darstellen und somit weit von deren Wirklichkeit entfernt sind. Bilder von Pflanzen kommen ihr schon näher, sind aber nicht mit quantifizierbaren Einheiten ausgestattet. Dieses Problem wird mit der Technik des Laser-Scanning überwunden. Hier liefern die Messungen der Zeit, die Hunderttausende von Laserstrahlen brauchen, um unter verschiedenen Winkeln die Sichtlinie zu einer Oberfläche zurückzulegen, Millionen von Daten, die deren

Beschaffenheit dreidimensional mit einer Genauigkeit abbilden können, die das menschliche Auge nicht erfassen kann.

Ein eindrückliches Beispiel dafür lieferte die 2018 in Basel gezeigte Ausstellung «Scanning Sethos». In der Grabkammer des ägyptischen Pharaos wurden mit Laser-Scan Aufnahmen von 64 Orten der Original-Kammer aus – soweit sie erhalten ist – Daten erhoben, die mittels 3D-Druck-Verfahren eine originalgetreue Wiedergabe der Reliefs ermöglichte. Darüber hinaus konnte aber trotz der seit der Entdeckung der Kammer im Jahr 1817 durch Plünderungen, unsachgemässe Forschung, Massentourismus und geologische Verschiebungen eingetretenen Beschädigungen durch Extrapolation eine kohärente Oberfläche der Grabkammerreliefs rekonstruiert werden. Von den Erstentdeckern verfertigte farbige Abbildungen dienten als Vorbild, um auch die Farbgebung der Reliefs zur Zeit seiner Entdeckung zu restaurieren. Mit beiden Techniken zusammen brachten die im Ausstellungsprojekt tätigen Restauratoren und Wissenschaftlerinnen die in gewisser Weise absurde Situation zustande, dass die Besucher der Ausstellung einen visuellen Eindruck der Grabkammer erleben konnten, der in Bezug auf die 1817 vorgefundene Ausstattung «wirklichkeitsnäher» war, als wenn sie zum Originalort in Ägypten reisen würden.

Outputs von Laser-Scans können demnach die Wirklichkeit sichtbarer Oberflächen präziser abbilden, als das Auge selbst sie wahrzunehmen vermag. Wenn mit dieser Methode die Gestaltentwicklung präziser und erst noch quantifizierbar erfasst werden könnte, würde ihre sorgfältige Beobachtung überflüssig. Aus einer geometrischen Perspektive konstruieren pflanzliche Entwicklungsprozesse Oberflächen aber in einem dreidimensionalen Raum (*ebd.* S. 3). Das bedeutet, dass es zur Wirklichkeit der Pflanze gehört, dass Organe einander verdecken, so dass ihre Oberflächen selten vollständig sichtbar sind. Weil die Laser-Scan-Technik auf der Reflektion von Wellen von der Pflanzenoberfläche beruht, kann sie verdeckte Strukturen nicht erfassen. Dies gelingt zwar mit Radarstrahlen, die je nach Wahl der Wellenlänge Oberflächen reflektieren oder durchdringen können. Die Auflösung dieser Messdaten ist jedoch zu gering, um die Gestaltdetails zu erfassen, die für die mathematische Analyse erforderlich sind.

Ein weiteres Problem ist generell die Bildung von Innenraum, die schon bei mehrschichtigen Zellverbänden entsteht. Die Pflanze hat jede Menge Gestaltmerkmale, die sie dem Betrachter verbirgt. Dieses Problem wird mit Röntgen- oder Magnetresonanzbildern überwunden. Diese Techniken erfordern aber ein geschlossenes Bildvolumen, das für die Grössendimensionen von ausgewachsenen Pflanzenorganen nicht ausreicht. Zwar kann etwa das initiale Wachstum von Wurzeln in Töpfen verfolgt werden. Wenn es aber um die Erfassung grösserer Strukturen geht, müssen diese für die

Bildgebung zerstört werden (*ebd.* S. 4 f.). Es wird dann von invasiven oder destruktiven Techniken gesprochen. Diese verhindern das Verfolgen der lebendigen Entwicklung.

Es ist spannend, dass bei der Erörterung der verfügbaren Techniken das Verhältnis zwischen dem Innen und Aussen zum Problem wird. Offensichtlich besteht in der technischen Umsetzung ein Trade-off zwischen der für die mathematische Analyse erforderlichen Präzision der Datengewinnung und der tatsächlichen Entfaltung der Pflanzengestalt in ihrem Lebensraum. Dazu verweisen die Autoren auf noch nicht gelöste Probleme in der Erfassung von Grössenordnungen, die mit dem Aussen und Innen der Pflanze zu tun haben. Aus erkenntnistheoretischer Perspektive könnte es sich aber um ein tiefer liegendes Problem handeln, das von Goethe immer wieder als die zu berücksichtigende Verbindung von «innerem» und «äusserem» Sehen thematisiert wurde. Er war mit der Naturwissenschaft seiner Zeit einig, dass die sinnliche Erfahrung nur die halbe Erfahrung sei, und dass es die Aufgabe der Wissenschaft sei, die inneren Gesetzmässigkeiten zu erfassen, die der Mannigfaltigkeit der sinnlichen Erscheinungen zugrunde liegen. Seine Auffassung, wie der Mensch zur Erkenntnis dieser inneren Gesetzmässigkeiten kommen kann, und welche Rolle die Mathematik dabei spielt, wich aber entschieden ab von der induktiv analysierenden Methodik, die in seiner Zeit ihren Anfang nahm und bis heute in ausgefeilter Form weiterentwickelt worden ist.

Goethe sah die entscheidende Kraft der Mathematik darin, dass sie ihre Grundelemente und Grundbegriffe nicht aus natürlichen Vorbildern ableitet, sondern sie in geistiger Selbstständigkeit erschafft. Dabei geht der idelle Entwurf der Betrachtung des Wirklichen voraus. In «Maximen und Reflektionen» (Nr. 573) verdeutlichet er dies am Beispiel eines Jungen, dem im Begreifen der Tatsache, dass der nächste Weg zwischen zwei Punkten schon als Linie gedacht werden muss, ehe sie mit dem Bleistift auf das Papier gezogen wird, die Quelle allen Denkens aufgeschlossen und das Verhältnis zwischen Potenz und Aktualisierung klar werde (vgl. *Cassirer*, S. 274).

Es war die Auffassung des Verhältnisses zwischen Erfahrung und Idee, die sich für Goethe aus der Natur der Mathematik ergab, die sein Vertrauen in das von ihm praktizierte und postulierte «Sehen mit Geistesaugen» stützte.

Gerade weil er in den Naturphänomenen Wirkungen eines Gesetzmässigen, der Idee, verortetete, die aber selbst nicht sinnlich sichtbar erscheint, musste für ihn dieses Gesetzmässige im Bewusstsein des Wissenschaftlers zu finden sein. Im Gegensatz zur abstrahierenden Vorgehensweise, die nur die quantifizierbaren Eigenschaften der Dinge als gesetzmässig anerkennt und damit das individuelle Bewusstsein aus der Wissenschaft fernhält, lag für ihn der Schlüssel zur Begriffsbildung in der Aufmerksamkeit auf die

eigenen kognitiven Operationen, die in der wissenschaftlichen Tätigkeit am Forschungsgegenstand ausgeführt werden. Nur in der Synthese von forschendem Subjekt und Objekt im Vorgang der Untersuchung selbst konnten aus seiner Sicht objektadäquate begriffliche Zuordnungen erfolgen.

Richtet man den Blick auf den Weg, den die Begriffsbildung bei der Konstruktion von mathematischen Modellen der Pflanze geht, erscheinen die festgestellten technischen Schwierigkeiten, die sich aus der Diskrepanz zwischen erfassbarer Präzision und Lebenszusammenhang ergeben, nicht weiter verwunderlich. So sehr auch die Erfassung von morphologischen Merkmalen gegenüber einfachen Messungen verfeinert wird, sind es doch immer einzelne Eigenschaften, bei denen statistisch aus vielen Tausenden von Daten das abgeleitet wird, was allen gemeinsam ist. Die Möglichkeit der Verallgemeinerung von Einzelphänomenen liegt bei dieser Vorgehensweise ja gerade im Verzicht auf das in der Einzelbeobachtung zugängliche Besondere zu Gunsten eines übergeordneteten Allgemeinen, das niemals mit einem einzelnen besonderen Phänomen übereinstimmt. Der statistisch aus der Erfahrung abstrahierte Begriff enthält inhaltlich immer weniger als jede der in ihm zusammengefassten Instanzen. Der Gewinn dieser Vorgehensweise liegt darin, dass mit dem Verzicht auf das Besondere des Gegenstandes auch die möglicherweise befangene Bedeutungszuschreibung des forschenden Subjektes ausgeschaltet wird, indem die wertneutrale Berechnung anstelle von individuellen Vorurteilen tritt. Diesen Gewinn sah auch Goethe, wenn er in «Der Versuch als Vermittler von Subjekt und Objekt» einzelnen Experimenten die Beweiskraft für eine Theorie abgesprochen hat und die «Vermannigfaltigung der Versuche» als die eigentliche Pflicht des Naturforschers postulierte.

Die Vermannigfaltigung der Versuche kann man den geradezu exzessiven Datenerhebungen zur Konstruktion von Modellen durchaus zusprechen. Um Simulationen zu erstellen wird die Entwicklung der Pflanze in der Zeit in sehr kleine Schritte zerlegt, um die Gesetzmässigkeiten der Wachstumsmuster zu eruieren. Gelingt es, auf dem Bildschirm Wachstum zu simulieren, entsteht die damit verbundene «lebendige» Bewegung durch eine Täuschung des Auges, das nur eine begrenzte Menge Bilder pro Sekunde als Einzelwahrnehmungen verarbeiten kann. Dass die Kontinuität des abgebildeten Prozesses folglich eine Täuschung ist, spricht dagegen, dass er das Wesen der Pflanzengestalt als grundlegende sich wiederholende Transformation repräsentiert. Die Simulation bringt die Aussenseite des simulierten Prozesses in die Sichtbarkeit. Das ist nicht wenig. Wie wir aus eigener Innenerfahrung wissen, lässt sich aus der Summe unserer Eigenschaften ein guter Teil unseres Verhaltens vorhersagen. Dennoch würde ich nicht sagen, dass ich die Summe meiner Eigenschaften bin. Ich fühle mich wesentlich als Zentrum

einer agierenden Kraft, die sich Eigenschaften aneignen kann. Ich verleihe ihnen die Bedeutung, die sie in mir und in der Welt entfalten.

Wenn nun das Wesen der Pflanzengestalt sich wiederholende Transformation ist – was die Autoren als das goethesche Paradigma bezeichnen –, setzt ihre Genese beständig wirkende Kraft voraus, die die kontinuierliche Entfaltung vorantreibt. Begriff und Bedeutung können aber nur von einem menschlichen Bewusstsein verliehen werden. Deshalb ist ein Erkennen oder Verstehen der Kraft, die der Pflanze wesentlich ist, für Goethe nur als Innenerfahrung denkbar.

So erklärt sich, dass eine seiner wesentlichen methodischen Forderungen war, die systematisch untersuchende Aufmerksamkeit gleich einem Atemprozess zwischen dem Forschungsgegenstand und der eigenen Bewusstseinstätigkeit pendeln zu lassen. D.h., sich über die Richtung des eigenen Tuns Rechenschaft zu geben und das eigene geistige Organ auf seine Eignung für den gewählten Gegenstand kritisch zu prüfen. Der Blick auf die eigene kognitive Bewegung, die das Wachstum einer Pflanze in der Vorstellung nachvollzieht, ermöglicht ein innerliches Krafterlebnis der Kontinuität, die sich in der Gestaltbildung für die Sinne wahrnehmbar ausdrückt. Diese Erfahrung kann in eine alternative Art der Begriffsbildung einfliessen, die das Allgemeine nicht aus den sinnlich wahrnehmbaren Einzelheiten des Besonderen ableitet, sondern es als das fasst, was die eine Besonderheit aus der anderen hervorgehen lässt – als eine Kraftgestalt, die je nach den modifzierenden Bedingungen anders in Erscheinung tritt, aber über die tatsächlich erscheinenden Phänotypen hinaus auch mögliche neue Ausgestaltungen in sich birgt. Je länger das Forscherbewusstsein bei den Phänomenen verweilt, in denen sich der Forschungsgegenstand äussert, desto mehr wird von letzterem in die Begriffsbildung einfliessen.

In diesem Konzept der synthetischen Begriffsbildung ist im Begriff nicht nur jedes einzelne Besondere, sondern auch die Fülle aller möglichen Formen enthalten. Das Modell der «Urpflanze» ist das Ergebnis einer solchen Begriffsbildung. In der «Metamorphose der Pflanze» sehe ich ein Ergebnis von Goethes methodischen Postulaten. Es kann als Paradigma fruchtbar gemacht werden. Was aber für den Fortschritt der Lebenswissenschaften ebenso relevant sein könnte, sind seine Forderungen nach einer methodischen Blickwendung: Ernst zu nehmen, dass die Bedeutungen und Sinnzusammenhänge, die die Wissenschaft findet, immer und ausschliesslich im menschlichen Bewusstsein auftreten, und dass dieses folglich Teil jeder Untersuchung sein muss. Und dass auch der Mensch Ergebnis der Evolution der Lebewesen ist, und dass folglich die Erfahrung eines «Innen» in gradueller Ausprägung ebenso allen anderen Organismen zuzuschreiben ist. Nur als Nebenbemerkung sei erwähnt, dass das Konzept des Organismus als

Kraftgestalt oder innere «Agency» in Bezug auf vieles, was wir heute dank unzähliger Experimente und Beobachtungen über die Evolution der Vielfalt der Lebewesen wissen, einen bedeutend höheren Erklärungswert hat als die tradierte Theorie der zufälligen Mutation mit nachfolgender Selektion. Ob der Weg, dessen Ergebnis die Akzeptanz dieses Konzepts wäre, mit der im zitierten Artikel angestrebten Synthese von Biowissenschaften, Mathematik und Morphologie erreicht wird, bleibt vorerst offen.

Aber dass die Gruppe um Dan Chitwood durchaus dazu beiträgt, festgefahrene theoretische Konzepte aufzuweichen, steht schon fest: In Versuchen mit einer Grünalge (*Caulerpa taxifolia*), die aus einer einzigen Zelle komplexe Strukturen wie einen Stamm und farnartige Blätter bildet, haben sie molekulare Techniken eingesetzt, um die Genexpression zu verfolgen. Sie verändert sich nach den gleichen Mustern wie entsprechende Strukturen bei vielzelligen Pflanzen. Das passt nicht zu der gängigen These, dass die Zellteilungsrate bei der Entstehung der Gestalt eine wichtige Rolle spielt.

Literatur

Bucksch, A. et al. (2018): Morphological Plant Modeling: Unleashing Geometric and Topological Potential within the Plant Sciences. Frontiers in Plant Science, Vol. 8, Article 900, S. 1–16. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00900

Cassirer, E. (1921): Goethe und die mathematische Physik. In: Aufsätze und kleine Schriften (1902–1921).

Kaplan, D.R. (2001): The science of plant morphology: definition, history, and role in modern biology. Am. J. Bot. 88, 1711–1741.

Ledford, H. (2017): Massive Database of 182'000 leaves is helping predict plants' family trees. Nature 547(7662):147. doi: 10.1038/nature.2017.22230

Ruth Richter
Forschungsinstitut am Goetheanum
Hügelweg 59
CH – 4143 Dornach
ruth.richter@goetheanum.ch