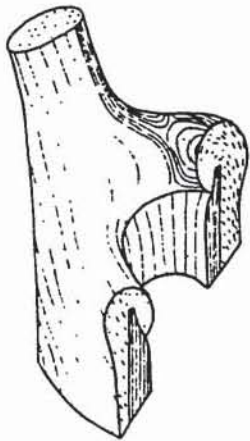


Pflanzen als natürliche Konstruktionen und das Prinzip Leichtbau

Ulrich Kull und Astrid Herbig



Zusammenfassung

Die natürliche Konstruktion "Pflanze" kann von verschiedenen Seiten her betrachtet werden. Eingangs werden die Architekturtypen und ihre Bedeutung an Beispielen besprochen und die Konstruktionsunterschiede mit der Evolution in Zusammenhang gebracht. Quantitative biomechanische Untersuchungen gingen bisher von den Ansätzen von Schwendener und Rasdorsky aus; es ist noch nicht versucht worden, Aussagen auf der Basis von Bic-Werten zu machen. Ein entsprechendes Arbeitsprogramm wird vorgestellt und vorläufige Ergebnisse kurz erwähnt. Schließlich wird an einem Beispiel auf die Dynamik pflanzlicher Konstruktionen eingegangen und Beziehungen zu menschlichen Konstruktionen an städtebaulichen Beispielen aufgezeigt.

Abstract

Plants assume an important position among natural constructions, which may be studied from different viewpoints. First, the architectural tree models and their significance are discussed and the different constructions are connected to the process of evolution. Quantitative investigations on biomechanics usually used the starting points of Schwendener and Rasdorsky. Hitherto it was not tried to make biomechanical assumptions on the methodological basis of the Bic-values. Our investigations include such an attempt and some preliminary results are shortly described. Finally, in an example, the dynamics of the plant structure is discussed and correlations to human constructions in town-planning are shown.

Einleitung

Unter den natürlichen Konstruktionen nehmen Pflanzen einen wichtigen Platz ein. Da Landpflanzen ortsfest sind, darf man erwarten, daß Analogien zu Architekturleistungen des Menschen bestehen. Bei der Bearbeitung natürlicher Konstruktionen sind daher Untersuchungen über konstruktive Eigenschaften von Pflanzen von großer Bedeutung. Von besonderem Interesse ist dabei, daß pflanzliche Konstruktionen Wachstumsprozesse zeigen, an denen Gesetzmäßigkeiten der Gestaltbildung erkannt werden können. Hier soll dargestellt werden, welche Aspekte der Konstruktion von Pflanzen (beschränkt auf Landpflanzen) derzeit vor allem bearbeitet werden und welche Untersuchungen im Rahmen der Erforschung natürliche Konstruktionen wir im Rahmen des SFB 230 begonnen haben.

Große Landpflanzen - das sind vor allem Bäume - sind in manchen Eigenschaften Bauwerken vergleichbar. Sie wurden auch bereits verschiedentlich zu Bestandteilen der menschlichen Architektur gemacht. Im Jugendwettbewerb "Natur und Bauen" waren sicher nicht zufällig Baumhäuser eine von Kindern besonders häufig dargestellte Konstruktion (1). Krautige oder halbkrautige Pflanzen sind in vielem ein kleineres, in ihrer Konstruktion partiell vereinfachtes Abbild von Bäumen. Wir können daher zunächst von der Betrachtung der Bäume ausgehen, werden aber dort, wo Vereinfachungen notwendig sind, krautige Pflanzen als die für modellhafte Untersuchungen einfacheren Objekte heranziehen. In der Regel bilden Bäume ein System, in dem Stütz- und Balkenelemente miteinander verschmolzen sind (1). Das Verzweigungssystem muß die optimale Lichtversorgung der Blätter garantieren. Es besitzt neben der Tragefunktion auch eine Formbildungsfunktion, denn die Assimilationsleistung der Blätter ist Voraussetzung für die weitere Gestaltentwicklung.

Die natürliche Konstruktion Pflanze ist, was die konstruktive Seite und deren Beziehung zur Formbildung betrifft, nicht so gut erforscht, wie man erwarten würde. Selbst bei d'Arcy Thompson (2) werden die pflanzlichen

Konstruktionen weniger detailliert behandelt als die tierischen. Die Konstruktionserfordernisse und -limitierungen der Organismen sind wesentliche Randbedingungen der Evolution. Kennt man sie nicht, so kann dies zu schwerwiegenden Fehlinterpretationen bei Aussagen zu Phylogenese und zur Evolutionsbiologie von Organismen führen (3, 4, 5).

Gestaltmorphologie

Um sich der Konstruktion Pflanze zu nähern, gibt es verschiedene Möglichkeiten. Daß Pflanzen und zumal Bäume unterschiedliche Konstruktionen aufweisen, ist den Pflanzenmorphologen schon früh aufgefallen. Dennoch haben die Gestaltsunterschiede erst relativ spät zu einer Typisierung geführt. Der Botaniker Corner (6) unterschied die beiden Grundformen des Weidentyps mit weitausladender Krone und häufig waagrechten Zweigenden und des Pappel-Typs mit vorwiegend aufstrebendem Wuchs.

Neuere Untersuchungen haben vor allem bei tropischen Bäumen eine Vielfalt der Baumformen erkennen lassen. Aufgrund der Verzweigungssysteme werden heute bei Bäumen 23 "Architektur-Typen" unterschieden (7, 8). "Architektur" bedeutet hier zunächst die Gestalt, die auf ein genetisch festgelegtes Programm zurückzuführen ist. Dieses genetische Programm wird während des Wachstums des Baumes realisiert. Daher ist der Architektur-Typ nicht allein durch das Bauschema bestimmt, sondern auch durch den Prozeß der Ontogenese, also der Gestaltwerdung. Zur vollständigen Beschreibung eines Architektur-Typs genügt daher die Angabe des Bauplans nicht, sondern es ist die Untersuchung und Darstellung einer Entwicklungsreihe (der Ontogenese) erforderlich. Im Prinzip kann die Zugehörigkeit zu einem dieser Typen bei jeder Pflanze festgestellt werden. Außer den 23 Typen, von denen Vertreter unter den Bäumen bekannt sind, gibt es noch mindestens zwei weitere. Davon ist einer nur bei krautigen Pflanzen gefunden worden, für den anderen kennt man kein Beispiel aus dem Pflanzenreich (8). Manche der Architektur-Typen erscheinen in der "fertigen" Gestalt nur wenig voneinander verschieden, andere führen zu völlig unterschiedlichem Bau der Organismen. Das vollständige Inventar aller Typen ist nur in der tropischen Vegetation anzutreffen; in den gemäßigten Klimazonen kommt in der natürlichen Pflanzendecke nur ein Teil der Typen vor. Es sei erwähnt, daß es



a)



b)



c)



d)

Abb. 1

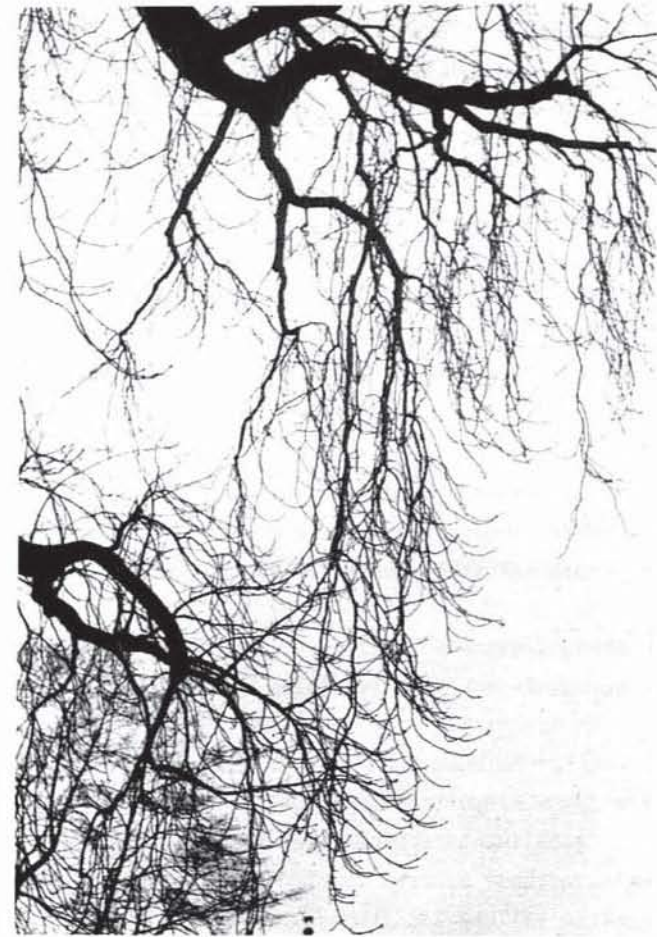


Abb. 2

- Abb. 1: Verschiedene Bäume des gleichen Architektur-Typs (schopfige Anordnung der Blätter; Ausbildung eines Blütenstandes führt zur nachfolgenden gabeligen Verzweigung; Leeuwenbergs Modell):
- a) Baumsenecio (*Senecio keniodendron*; Mt. Kenya)
 - b) Drachenbaum (*Dracaena draco*; Tenerife)
 - c) Kokkerboom (*Aloe dichotoma*; Namib-Wüste)
 - d) Essigbaum (*Rhus typhina*, gepflanzt in Mitteleuropa)

- Abb. 2: Bogenförmiger Verlauf von Zweigen der Roßkastanie (*Aesculus hippocastanum*). Alle Knospen zeigen nach oben, dennoch hängen die Zweige - schwerkraftbedingt - nach unten. Einige Äste bzw. Zweige, die eher waagrecht orientiert sind, setzen das Achsensystem durch weitere Verzweigung fort

auch andere Modelle zur Klassifizierung pflanzlicher Verzweigungssysteme gibt, die zum Teil die funktionelle Seite und die Biomechanik stärker berücksichtigen, die aber keine integrierende Architektur-Typen-Beschreibung liefern (9, 10).

Für die Gestaltbildung bei den Wurzeln gibt es naturgemäß sehr viel weniger Untersuchungen, obwohl schon Anfang unseres Jahrhunderts festgestellt worden war, daß die Wurzel-Architektur insbesondere von Pflanzenarten der Trockengebiete außerordentliche erbliche Gestaltsunterschiede aufweisen kann (11). Offenbar ist bei Limitierung des pflanzlichen Wachstums durch die Verfügbarkeit von Licht vor allem die Gliederung der oberirdischen Biomasse und damit das Verzweigungssystem und die Blattstellung für die Gestaltbildung der Pflanze bedeutsam, bei Limitierung durch die Verfügbarkeit von Wasser hingegen vorwiegend die Morphologie der unterirdischen Biomasse und damit vor allem des Wurzelsystems.

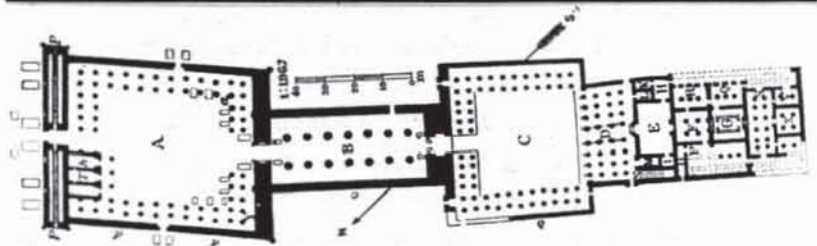
Erstaunlich bleibt, daß die außerordentliche Erscheinungsvielfalt von Bäumen sich in nur 23 Typen einteilen läßt. Allerdings ist die Gestalt nicht allein durch den Architektur-Typ bestimmt. Bei gleichem Architektur-Typ kann die äußere Erscheinung von Pflanzen sehr verschieden sein (Abb. 1). Zum Teil sind diese Proportionsunterschiede genetisch festgelegt. Zum Teil sind die Gestaltsunterschiede aber auch durch die positiven und negativen Umwelteinflüsse während der individuellen Entwicklung einer Pflanze (z.B. unterschiedliche Lichtverhältnisse, Tierfraß u.a.) verursacht, biologisch gesprochen also modifikatorische Differenzen. Die Beschreibung der Architektur-Typen trägt dem Rechnung durch Unterscheidung des "idealen" oder "angeborenen" Typus von einem "opportunistische" Typus (8), der durch die modifizierenden Einflüsse entsteht und bei dessen Ausbildung schlafende Knospen, Sekundärmeristeme, Stockausschläge usw. eine Rolle spielen können. Wie schon geringfügige genetische Unterschiede sich erheblich auf die Gestalt auswirken können, zeigen die "Trauer"-Mutanten vieler Bäume: die Trauerbuche gehört natürlich dem gleichen Architektur-Typ zu wie die normale Form der Rotbuche in unseren Wäldern. Durch die schlaffen Zweige, also durch deren andere mechanische Eigenschaften, wird aber ein ziemlich abweichender Eindruck erweckt. Dies zeigt insbesondere auch das sogenannte "Lametta-Syndrom" der Fichte, das im Rahmen der neuartigen Waldschäden diskutiert wird. Es handelt sich dabei um das Auftreten

hängender Seitenzweige zweiter Ordnung. Wie Ziegler (12) zeigen konnte, ist das Hängen der Zweige aber kein Schadsymptom, sondern hat eine genetische Basis. Bei der normalen Rotbuche entsteht der aufrechte Stamm durch das alljährliche Aufrichten des zunächst schlaffen Endtriebes (13). Bei der Roßkastanie werden die Seitenzweige zunächst hängend angelegt und richten sich dann - soweit sie erstarken - auf. Für das Erscheinungsbild der Roßkastanie ist dieser Vorgang der Gestaltwerdung von großer Wichtigkeit (Abb. 2). Diese Fälle mögen genügen, um aufzuzeigen, daß zur pflanzlichen Architektur notwendigerweise auch eine Dimension der Gestaltwerdung gehört. Dieser versuchen wir an Beispielen nachzugehen und sie biomechanisch-quantitativ zu erfassen.

Die Gestaltbildung erfolgt bei größeren Pflanzen wie z.B. Bäumen durch die Reiteration festliegender Bauprinzipien entsprechend einer Addition gleichartiger Moduln (8, 14). Eine Pflanze ist daher nie vollständig, sondern hat stets nur eine vorläufige Gestalt. Bei den meisten Tieren hingegen wird die Individualentwicklung mit Erreichen einer definitiven Gestalt abgeschlossen. Allerdings gibt es Tiere, die in teilweise fest-sitzenden Kolonien leben und in der Evolution eine entsprechende Modul-Konstruktion entwickelt haben (Bryozoen, Graptolithen, mit gewissen Einschränkungen Korallen). Wie physiologische Untersuchungen ergaben, stehen die Moduln vor allem in Kooperation und weniger in Konkurrenz zueinander (15). Das Modulprinzip ermöglicht das Absterben einzelner Einheiten, ohne daß der Gesamtorganismus zugrunde gehen muß. Dies ist der "damage tolerance" der Leichtbautechnik vergleichbar. Gerade bei langlebigen Landpflanzen ist ein solches partielles Absterben oft ein normaler Vorgang in der Entwicklung am natürlichen Standort (1) oder sogar für das Überleben an extremen Orten (Wüstenvegetation!) notwendig. Auch in der Architektur des Menschen findet man den Unterschied zwischen reiterativen und nichtreiterativen Strukturen. Als Beispiel für erstere diene der ägyptische Tempel (z.B. Großtempel von Karnak und Luxor) oder die minoischen Palastanlagen Kretas; als Beispiel für letztere der klassisch griechisch-dorische Tempel (vgl. Abb. 3). Reiterative Strukturen sind nie endgültig; ein Weiterbau ist jederzeit möglich.



a)



b)

Abb. 3: Nichtiterative und iterative Architektur am Beispiel antiker Tempel:
 a) dorischer Tempel in Paestum
 b) ägyptischer Tempel in Luxor (mit Grundriß nach Curtius, aus Handbuch der Kunstwissenschaft)

Evolution

Die genetisch festgelegten Konstruktionsunterschiede der Pflanzen sind in der Evolution entstanden. Nun kann diese in der Regel nicht zu einem Optimum führen, da die Organe der Lebewesen fast immer mehrere Funktionen gleichzeitig innehaben. So hat beispielsweise das Holz eines Baumstammes nach der Bildung vor allem die Funktion der Wasserleitung und ist anfänglich nur untergeordnet an der Tragefunktion beteiligt. Erst später tritt es in das Ensemble der "nur" tragenden Bauelemente ein. Zu beachten sind ferner die durch die evolutive Vorgeschichte und die Limitierungen des Materials und der Konstruktionserfordernisse gegebenen Beschränkungen. Bei Landpflanzen entstehen daher konstruktive Kompromisse, welche die Hauptfunktionen der Ernährung (die Photosynthese benötigt Licht), der mechanischen Stabilität, der Wasserversorgung und der Bildung und Verbreitung von Fortpflanzungseinheiten berücksichtigen müssen. Die Zahl der variablen Parameter ist also groß und somit kann es nie eine optimale Gestalt geben, sondern nur verschiedene relativ gute Konstruktionen. Je nach der Gewichtung der einzelnen Faktoren werden diese unterschiedlich aussehen. Besteht z.B. in der Baumschicht einer Vegetation keine Konkurrenz ums Licht und ist Wasser reichlich verfügbar, so können sich Schopfbäume entwickeln. Wirkt der Wasserfaktor begrenzend, so sieht die Pflanze bei gleichem Architektur-Typ anders aus (vgl. Abb. 1). Weiterhin muß das genetische Programm so beschaffen sein, daß die ortsfeste Pflanze auf Veränderungen der Umweltbedingungen zu reagieren vermag, zum Beispiel unter extremen Verhältnissen durch partielles Absterben. Aus diesem Grunde kann die Gestalt einer Pflanze nie völlig genetisch festgelegt sein und sind alte Bäume Individuen von je eigener Gestalt, in der die individuelle Geschichte zumindest teilweise noch ablesbar ist.

Quantitative Untersuchungen

Die Untersuchung der Festigkeitseigenschaften von pflanzlichen Zellen und Geweben wurde im vorigen Jahrhundert durch Schwendener (16, 17) begründet. Viele der damals gemessenen Werte sind in Tabellenwerke eingegangen. In den ersten Jahrzehnten unseres Jahrhunderts hat Rasdorsky (18) die Vorstellungen Schwendeners erweitert und zum Teil korrigiert. Auf Rasdors-

kys Vorstellungen über die Verbundbauweise fußen alle modernen pflanzenbiomechanischen Arbeiten, die aber für krautige Pflanzen sehr spärlich geblieben sind. Für Gräser liegt eine neue detaillierte Untersuchung von Nachtigall und Mitarbeitern aus unserem SFB vor (19). Überlegungen zur Abhängigkeit der Biegesteifigkeit vom anatomischen Aufbau der Pflanze, wie sie zuerst von Rasdorsky vorgelegt wurde, können zu einer Klassifizierung der Pflanzen aufgrund der anatomisch festgelegten Konstruktionsprinzipien herangezogen werden. Die Grundzüge einer solchen Klassifizierung hat Mosbrugger (20) in einer für den SFB durchgeführten Untersuchung vorgelegt. Stabilität und Flexibilität von Achsen sind dabei die beiden grundlegenden Gliederungsfaktoren.

Intakte Organe im lebenden Zustand - bei Tragesystemen also zunächst Sproßachsen - sind bisher bei Pflanzen kaum quantitativ untersucht worden, vermutlich schon deshalb, weil sie außerordentlich heterogen (anisotrop) aufgebaut sind. In der Technik bezeichnet man Strukturen, die ihre Trageleistung mit geringem Masse- bzw. Energieaufwand erbringen, als Leichtbauweise und das Verhältnis von tragender zu getragener Masse als die Leichtbauzahl. Um das Prinzip Leichtbau zu erfassen, kann man auch bei Pflanzen den methodischen Ansatz von F. Otto heranziehen (21, 22). Danach kann die Leistungsfähigkeit einer Konstruktion aufgrund des Bic-Wertes beurteilt werden, welcher das Verhältnis von aufgewendeter Masse zum Produkt aus belastender Kraft mal zugehöriger Übertragungsstrecke im Versagensfall (Bruch) angibt:

$$\text{Bic} = \frac{\text{Masse}}{\text{Kraft} \cdot \text{Weg}} \quad \left[\frac{\text{g}}{\text{Nm}} \right]$$

Ein geringer Bic-Wert bedeutet hohe Effektivität und alle Objekte einer Klasse, die bei gegebener Belastungsart besonders niedrige Bic-Werte aufweisen, fallen unter die Rubrik "Leichtbau". Der Bic-Wert ist abhängig von Form, Material und Belastungsart des Objekts, aber weitgehend unabhängig von seiner Größe. Vor allem bei Druck- und Biegebeanspruchung, die bei pflanzlichen Objekten von besonderer Bedeutung sind, muß der Bic-Wert bezogen werden auf die relative Schlankheit des Objektes

$$\lambda = \sqrt{\frac{\text{Weg}}{\text{Kraft}}}$$

Bei geometrisch ähnlichen Objekten bleibt die Größe λ konstant. Dieser methodische Ansatz erlaubt es, die Festigkeitseigenschaften beliebiger Pflanzenteile auch im lebenden Zustand mit einem vertretbaren Aufwand zu bestimmen und durch eine große Zahl von Messungen statistisch abzusichern. Auf dieser Grundlage kann die Frage nach dem Leichtbau bei Pflanzen in Angriff genommen werden.

Unsere bisherigen Ergebnisse zeigen, daß wegen der Streuung eine große Zahl von Einzelmessungen erforderlich ist. Wir finden zwischen unverholzten Sproßachsen verschiedener Pflanzenarten erhebliche Unterschiede in den Bic-Werten. Bei den Pflanzen mit sekundärem Dickenwachstum verändert sich mit dessen Einsetzen die Zugfestigkeit rasch. Der Wassergehalt der Gewebe hat Einfluß auf deren Zugfestigkeit; dabei scheinen Korrelationen zur unterschiedlichen Widerstandsfähigkeit der Pflanzen gegenüber Trockenheit zu bestehen: der optimale Bic-Wert liegt bei umso niedrigeren Wassergehalten der lebenden Gewebe, je dürreresistenter die Art ist. Die Bruchflächen werden mit Hilfe der Rasterelektronenmikroskopie untersucht, um genauere Kenntnisse über den Bruchvorgang zu erlangen. Bei manchen Pflanzenarten ergeben sich bei der Bestimmung des - naturgemäß besonders interessierenden - Bic-Wertes der Biegefestigkeit methodische Probleme, die noch nicht vollständig ausgeräumt sind.

Ökonomie

Der nächste Schritt muß darin bestehen, das Aufwand/Nutzen-Verhältnis, also die Wirtschaftlichkeit der pflanzlichen Konstruktion, zu erfassen. Für die ortsfeste Pflanze, die mit ihren Nachbarn um Licht und Bodenvolumen konkurriert, ist dieser Aufwandskennwert entscheidend für die Wettbewerbsfähigkeit. Biologisch gesehen ist der Kostenfaktor der Energieaufwand, der zur Herstellung der tragenden Masse erforderlich ist. Gemessen werden kann aber zunächst der Energieinhalt der pflanzlichen Substanz. Allerdings liefern solche Messungen nicht nur die Energieinhalte der tragenden Komponenten (Zellwände) und der diese erzeugenden Zellinhalte (Protoplasten), sondern auch der Reservestoffe. Daher muß man letztere quantitativ bestimmen und ihre Energieinhalte berechnen. Hier bestehen auch enge Beziehungen derartiger Untersuchungen zu ökologischen Fragestellungen. Der Energieinhalt der Reservestoffe kann dann vom Gesamtenergiein-

halt subtrahiert werden, um den aktuellen Energieinhalt des Tragesystems zu erhalten. Die Reservestoffe dienen zum Teil der zukünftigen Erweiterung des tragenden und des energiegewinnenden Systems. Die Strategien der Pflanzen zur Erhaltung und Erweiterung der Systeme sind verschieden; hierzu können durch Messungen von Energieinhalten über längere Zeit hinweg Aussagen gemacht werden. Solche Messungen sind schon deshalb erforderlich, weil neben dem aktuellen Energieinhalt des Systems auch der Energieaufwand zu seiner Erhaltung festgestellt werden sollte. Multipliziert man nun die Bic-Werte mit dem festgestellten Energieinhalt bzw. Energieaufwand E (kJ/g), so erhält man Aufwandkennwerte, die man als die konstruktive Wirtschaftlichkeit K bezeichnen kann:

$$K = \text{Bic} \cdot E$$

K ist somit eine dimensionslose Zahl.

Eine zunächst ausgeklammerte Problematik liegt darin, daß der Energieaufwand einer Pflanze zur Produktion einer bestimmten Masse tragenden Materials unterschiedlich hoch sein kann, bedingt beispielsweise durch verschiedene Effektivität des Photosyntheseapparats oder durch unterschiedliche Verfügbarkeit von Wasser und Ionen (Nährsalzen). Die Pflanze arbeitet jeweils so ökonomisch wie möglich; die Anwendbarkeit der ökonomischen Theorie auf die natürliche Konstruktion Pflanze ist neuerdings dargestellt worden (23).

Leichtbau und Pneus bei Pflanzen

Die tragende Masse wird bei jungen Pflanzen und wurde gleichermaßen bei den ersten Landpflanzen ausschließlich von weichen Zellen gebildet, die infolge des Zellinnendrucks (Turgor) Hydroskelett-Eigenschaften aufweisen. In der Evolution kam es dann sehr bald zur Ausbildung teilweise verholzender Zellen und dann von ganzen verholzten Geweben, welche ihrerseits die Grundlage für die Holzbildung und damit Voraussetzung für die Organisationsform Baum sind. Die Evolution bis zu Baumformen ist in der Gruppe der farnartigen Pflanzen (Pteridophyten) abgelaufen. Bei den Blütenpflanzen kam es dann umgekehrt wieder zur Bildung kleiner, krautiger und kurzlebiger Arten aus verholzten Ausgangsformen. Es ist sinnvoll, das Prinzip Leichtbau zunächst bei nicht bzw. wenig verholzten Pflanzen

zu untersuchen. Bei den Holzpflanzen ergeben sich wegen der größeren erforderlichen Kräfte methodische Probleme. Die unverholzte Pflanzenzelle ist biomechanisch als Pneu zu beschreiben; nach Verholzung der Wand liegt ein erhärteter Pneu vor. Der Vergleich lebender und durch Eintauchen in kochendes Wasser getöteter Sproßachsen mit geringer Verholzung zeigt, daß in der Gesamttendenz die Bic-Werte für Zug und Biegung nach Abtöten größer (also schlechter) sind. Beim Bic-Wert für Zug ist dies nicht festzustellen; hier ist eher eine Verringerung bei toten Geweben zu erkennen (aber bisher statistisch noch nicht abgesichert). Auf die Druckfestigkeit und Biegesteifigkeit der krautigen Pflanze hat also offenbar ihr Pneu-Charakter einen Einfluß; werden die Pneus durch Kochen zerstört, so sind die Bic-Werte schlechter. Auf molekularer Ebene ist die Zugfestigkeit der Zellwände primär durch die Cellulosefasern bedingt; dem Druck widerstehen bei unverholzten Wänden vor allem die gequollenen amorphen Matrix-Polysaccharide (und Proteoglykane), bei verholzten Wänden das relativ hydrophobe Lignin (Holzstoff). Verholzte Zellen sterben häufig ab; vor allem im Holz wird die Festigkeit somit durch totes Gewebe bestimmt. Dies ist energiesparend. Das System der weichen Pneus mit hohem Innendruck ist vor allem bei kleinen Kräften günstig; insbesondere kann damit bei geringem Masseaufwand eine hohe Biegesteifigkeit erzielt werden, sofern eine ausreichende Wasserversorgung der Pflanzen gewährleistet ist. Hohe Kräfte werden hingegen am besten über verfestigte Strukturen übertragen, die in der Pflanze nicht mehr unmittelbar vom Wasserhaushalt abhängig sind. Ihre Festigkeit nimmt sogar mit Austrocknung noch zu. Ein an die Verhältnisse bei Knochen erinnernder Extremfall wird durch Einlagerung von Mineralstoffen in die Wand erreicht, wie sie für viele Gräser typisch ist. Man kann hier von einer partiellen Ausfächung eines durch die Cellulosefasern gebildeten Fachwerks sprechen. Eine merkwürdige und weitgehend unklare Stellung haben Schleimzellen und Schleimgänge in den Pflanzen inne. Sie enthalten schleimige, stark gequollene Matrix-Polysaccharide zumeist in toten Zellen. Bei guter Wasserversorgung liegen somit Pneus bzw. Pneusäulen vor, für die nach ihrer Fertigstellung aber keine Energie mehr aufzuwenden ist. Beziehungen der Schleime zum Wasserhaushalt der Pflanzen bestehen unzweifelhaft (24); ob die Schleimzellen auch eine konstruktive Funktion haben und auf die Biegesteifigkeit Einfluß nehmen können, ist völlig unklar. Die krautige Art Pachysandra aus der Familie Buchsbaumgewächse (bei uns eine häufige Zierpflanze), die zahlreiche Schleimgänge in der Form von Pneusäulen enthält, kann insbesondere bei Kälte viel Wasser

verlieren und zeigt dann die üblichen Welkerscheinungen. Sobald wieder Wasser zugeführt wird, erfolgt eine rasche Regeneration der Pneustruktur der ganzen Pflanze (Abb. 4). Der Bic-Wert nimmt bei Pachysandra mit Zunahme der - nur schwachen - Verholzung ab, obwohl die Traglast kaum ansteigt. Dies dürfte ein Hinweis sein, daß die Verholzung dieser Art eher als ein "evolutiver Rest" anzusehen ist: die ursprünglichen Buchsbaumgewächse sind Holzpflanzen; Pachysandra ist im Evolutionsverlauf zur krautigen Lebensform übergegangen.



Abb. 4: Pachysandra: gleiche Pflanze im normalen Zustand (pralle Pneus) und unter Wassermangel nach Kältebehandlung (Innendruck der Pneus abgesunken)

Dynamik pflanzlicher Konstruktionen und ihre Beziehung zu menschlichen Konstruktionen

Das Prinzip Leichtbau bezieht sich zunächst auf das statische Bild der Pflanze. Diese ist aber - wie schon dargestellt - als lebendiger Organismus in dauernder Veränderung begriffen. Man darf die Dynamik des Vorgangs, der die Konstruktionen liefert, nicht aus dem Auge verlieren. Im SFB 230

sind bereits Untersuchungen, die auch in diese Richtung zielen, am sogenannten Reaktionsholz von Bäumen durchgeführt worden (25, 26). Die Dynamik kann man häufig nicht direkt verfolgen, aber die Geschichte einer pflanzlichen Konstruktion ist oft an ihrer augenblicklichen Beschaffenheit abzulesen. Geeignete Objekte sind zum Beispiel Bäume, die größere Bereiche (mehrere bis viele Moduln) verloren haben und danach regenerieren. Da an der Veränderung der Gewebestrukturen, insbesondere des Holzes, die Geschichte der Regeneration zu erkennen ist, lassen sich die konstruk-

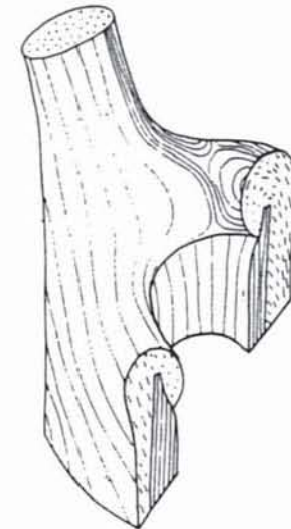


Abb. 5: Stammkopf einer Roßkastanie mit altem Holz, Oberwallung und Ansatz eines Astes, der zur Ersatzachse wurde. Die Faserrichtungen des Holzes sind angegeben (Zeichnung A. Herbig)

tiven Veränderungen ermitteln. Wir bearbeiten daher solches Material (von Herrn Gartenarchitekt G. Sinn freundlicherweise zur Verfügung gestellt), wobei die Untersuchung der mechanischen Eigenschaften der Zusammenarbeit mit Ingenieuren (Teilprojekt D 6 des SFB; vgl. Beitrag Wessolly et al.) bedarf. Als konkretes Beispiel mögen hier die Befunde vom Stammkopf einer Roßkastanie dienen, der nach dem Absägen vor etwa 25 Jahren die Schnitt-

stelle überwallte und an dem ein Seitenzweig heranwuchs und erstarkte und so als Aufsitzer eine Ersatzachse ausbildete (Abb. 5). Der Verlauf der in den verschiedenen Phasen dieser historischen Entwicklung gebildeten Bauelemente des Holzes zeigt die Geschichte auf. Nach der Dekapitierung spielt die Aufrechterhaltung der Wasserversorgung zunächst keine limitierende Rolle mehr, so daß die Mechanik allein über die Ausrichtung der ersten verholzenden Regenerationsgewebe entscheidet. An Stelle der vorher bestimmenden Transportrichtung nach oben ist deshalb in der Überwallung der Wunde zunächst die Querrichtung bevorzugt. Als bald beginnen aber Knospen auszutreiben. Der größte Seitenzweig nahe der Schnittstelle wird zum bevorzugten Wachstumsbereich. Dementsprechend wird der Transport von Wasser in dessen Richtung gelenkt und dieser Vorgang verstärkt sich mit dem Wachstum dieser Ersatzachse autokatalytisch. Somit werden die Elemente des nunmehr neu gebildeten Holzes allmählich immer stärker auf diese Transportrichtung ausgerichtet. Es entstehen durch starke Jahreszuwächse leistungsfähige Wasserleitungsbahnen in der nun bevorzugten Richtung. Da das Wachstum stets in Form "weicher" Zellen erfolgt (1), geht diese Ausrichtung sowohl der Transport- wie der Tragefunktion des gebildeten Holzes voraus; sie ist also gewissermaßen "vorgeplant" durch die pflanzlichen Korrelationen, deren physiologische Ursachen nur unzureichend bekannt sind. Analoge Korrelationen findet man aber bei Systemen fernab vom energetischen Gleichgewichtszustand durchaus auch in anorganischen, nicht-lebenden Systemen, wie beispielsweise die Musterbildung einer Schneeflocke zeigt (27, 28). Mit dem Erstarren des Aufsitzers bleibt das Wachstum der anderen Zweige zurück; um schlafende oder nicht mehr weiterentwickelte Knospen wird neugebildetes Holz herumgebaut und schließlich werden sie von Holz überwachsen und führen so zu Wirbeln, welche den Regenerations- und Überwallungsbereich weiter stabilisieren.

Diese Entwicklungsgeschichte einer pflanzlichen Regeneration hat überraschende Analogien in der Entwicklung menschlicher Siedlungsstrukturen, wenn man davon absieht, daß sich die Regeneration der Pflanze in drei, die Entwicklung von Straßenzügen aber in zwei Dimensionen abspielt. Eine nicht mehr zureichende historisch gewachsene Verkehrsverbindung kann verlassen und durch eine neue, leistungsfähigere vorgeplante Verbindung ersetzt werden. So läßt sich an historischen Karten und Stadtplänen des vorigen Jahrhunderts von Stuttgart leicht ablesen, daß eine alte Verkehrsverbindung im Stuttgarter Westen zu den wenigen Häusern in der Flur Vogel-

sang die jetzige Breitscheidstraße war, die bis heute einen unregelmäßigen Verlauf zeigt, der nicht in das regelmäßige Straßengitter paßt. Als in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts die Siedlungstätigkeit (anfänglich im Vogelsang-Gebiet) zunahm - von Wilhelm Raabe mit dichterischer Freiheit in seinem Roman "Akten des Vogelsangs" dokumentiert - reichte sie nicht mehr aus und es wurde als neue Verkehrsverbindung die Schloßstraße gewählt (29), die nach dem 2. Weltkrieg teilweise noch verbreitert wurde (Abb. 6). Noch eindrucksvoller ist der Vergleich mit einem Stadtorganismus, der durch längerzeitigen starken Einwohnerverlust schrumpfte und dann allmählich wieder heranwuchs. Dies zeigt in beispielhafter Weise die Stadtentwicklung Roms (Abb. 7). Nachdem die Stadt im Mittelalter klein geworden war, bestand fast nur noch ein System unregelmäßiger Gassen in einem kleinen Teil des Alten Roms anstelle des regelmäßigen Hauptstraßen-Netzes der spätrömischen Kaiserzeit (30, 31). Unter Julius II entstand zur Verbesserung der Verkehrsverhältnisse der allmählich wieder wachsenden Stadt als ein erster geplanter Straßendurchbruch die Via Giulia. In der Folgezeit wurde teils auf das antike Straßensystem zurückgegriffen, teils - beginnend unter Sixtus V - ein neues Straßennetz geplant, das bei anderer Führung im Detail in den Grundzügen durchaus dem antiken Netz entspricht (32) und große antike Bauwerke wie Kolosseum und verschiedene Thermenruinen als Knoten einbezieht, um welche die Straßen dann herumgeführt werden mußten. Dieses organische Straßengerüst - so von Brinckmann (33) bezeichnet - darf als eine natürliche Konstruktion angesehen werden. Technische Konstruktionen des Menschen sind nämlich als natürlich zu bezeichnen, wenn ihre Entstehung Analogien zu Vorgängen in der lebenden Natur zeigt (22). Die Analogien zur untersuchten Entwicklung der dekaptierten Baumachse sind augenfällig.

Abb. 6 und Abb. 7 bitte wenden

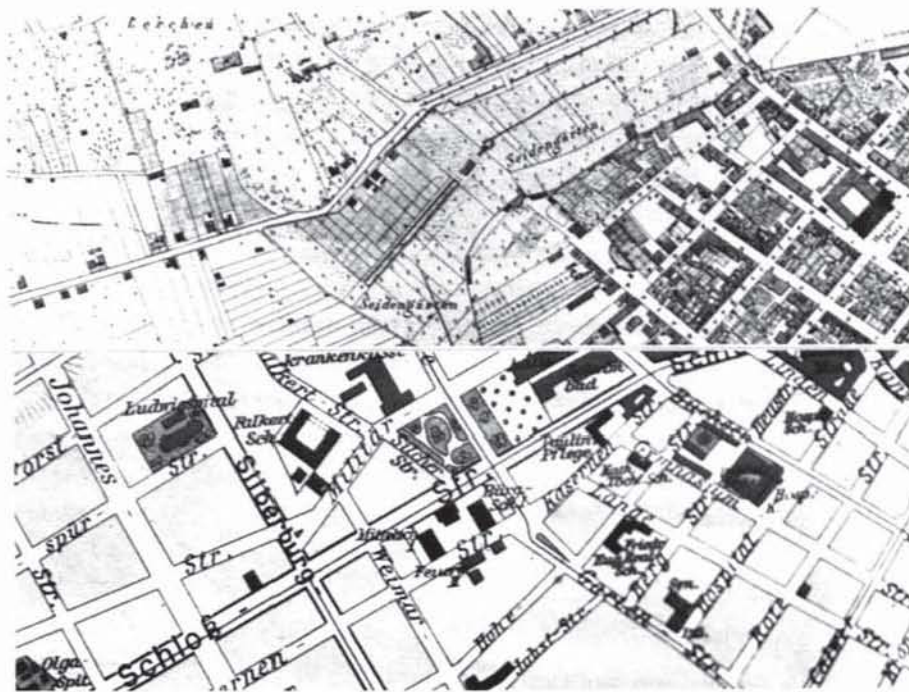


Abb. 6: Stadtplan Stuttgart West, Ausschnitte.

Oben: Plan von 1842: die Straße nach Westen verläuft unregelmäßig durch die Fluren.

Unten: Plan von 1936: die alte Straße (damals Militär-, heute Breitscheidstraße) zeigt den gleichen Verlauf, ist aber als Hauptverkehrsweg durch die gerade verlaufende Schloßstraße ersetzt

Abb. 7: Stadtplanausschnitte von Rom:

a) Straßenverlauf in der Spätantike

b) Stadtplan von 1951 (aus Neomario, Lit. 28). Nahe dem Tiberufer ist die Via Giulia als erster Straßendurchbruch in der mittelalterlichen Stadt zu erkennen. Von der Piazza del Popolo (oberer Bildrand) gehen drei gerade Straßen aus, die auf die antike Straßenführung zurückgehen

c) Ausschnitt aus einem Stadtplan von 1864 (aus Foerster, 1864). Der Quirinal (rechts) wird von den Straßenzügen der Via Sistina und der Via Quirinale gekreuzt, die ähnlich antiken Straßen verlaufen, aber neu angelegt sind. Der Durchbruch des Corso Vittorio-Emmanuele durch die Altstadt zum Tiber hin existiert noch nicht

Literatur

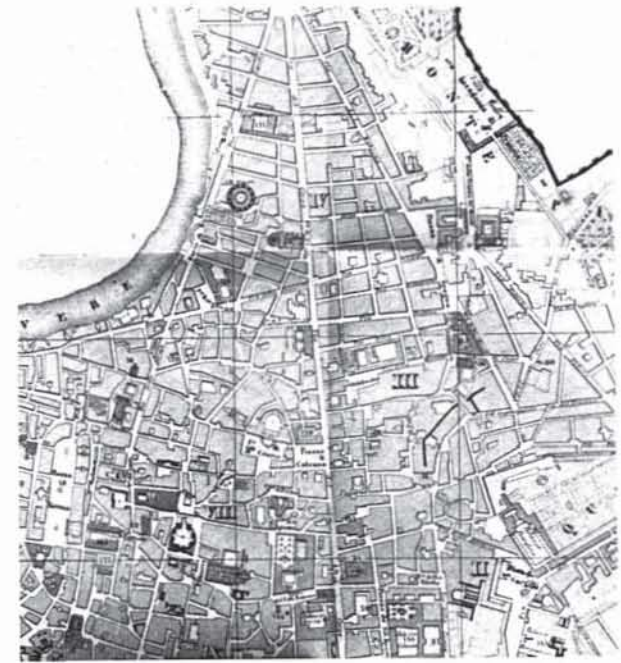
- (1) Otto, F. (und Mitarbeiter): Natürliche Konstruktionen, Stuttgart, 1982
- (2) Thompson, D'Arcy W.: On growth and form; Cambridge, 1942 (Nachdruck 1966)
- (3) Gould, S.J.; Lewontin, R.C.: The spandrels of San Marco and the panglossian paradigm: a critique of the adaptationist program. Proc. R. Soc. Lond. B 205, 581 - 598, 1979
- (4) Reif, W.-E.: Projektbereich Biologie: Über Wachstum und Form, Arcus 1985, 56 - 61 und
Reif, W.-E.; Thomas, R.D.K.; Fischer, M.X.: Constructional morphology: the analysis of constraints in evolution. Acta Biotheor. 34, 233 - 248, 1985
- (5) Gutmann, W.F.: Das neue Evolutionskonzept: Erweiterung oder Neube-gründung? Biol. Rdsch. 23, 255 - 239, 185
- (6) Corner, E.J.H.: The life of plants; London, 1964
- (7) Tomlinson, P.B.: Tree architecture. Amer. Sci. 71, 191 - 199, 1983
- (8) Hallé, F; Oldeman, R.A.A.; Tomlinson, P.B.: Tropical trees and forests, Berlin, 1978
- (9) Lück, J.; Lück, H.B.: Modellbildungen zur pflanzlichen Verzweigung. Ber. dtsh. Bot. Ges. 95, 75 - 97, 1982
- (10) McMahon, Th.A.; Kronauer, R.E.: Tree structures: deducing the principle of mechanical design. J. theor. Biol. 59, 443 - 466, 1976
- (11) Cody, M.L.: Roots in plant ecology. Trends Ecol. Evol. 1, 76 - 78, 1986
- (12) Ziegler, H.: Pflanzenphysiologische Aspekte der Waldschäden, Rhein.-Westf. Akad. d. Wiss., Vorträge N 347, 7 - 30, 1986
- (13) Roloff, A.: Morphologische Untersuchungen zum Wachstum und zum Ver-zweigungssystem der Rotbuche (Fagus sylvatica L.). Mit. Dtsch. Dendrol. Ges. 76, 5 - 47, 1986
- (14) Bell, A.D.: The simulation of branching patterns in modular orga-nisms. Phil. Trans. R. Soc. Lond. B 313, 143 - 159, 1986
- (15) Hardwick, R.C.: Physiological consequences of modular growth in plants. Phil. Trans. R. Soc. Lond. B 313, 161 - 173, 1986



Abb. 7a)



b)



c)

- (16) Schwendener, S.: Das mechanische Prinzip im anatomischen Bau der Monocotylen mit vergleichenden Ausblicken auf die übrigen Pflanzklassen. Leipzig, 1874
- (17) Schwendener, S.: Die Festigkeit der Gewächse. Jh. Ver. vaterl. Naturkde. Württ. 34, 76 - 81, 1878
- (18) Rasdorsky, W.: Über die Baumechanik der Pflanzen. Biol. Gen. 1, 63 - 94, 1929 u. Biol. Gen. 12, 359 - 398, 1937
- (19) Nachtigall, W.: Pflanzenbiomechanik. Konzepte SFB 230, Heft 24, 1986
- (20) Mosbrugger, V.: Die Bauform bei Landpflanzen. In: Konzepte SFB 230, Heft 16, 145 - 149, 1986
- (21) Grundlagen: Form-Kraft-Masse 1; IL 21, bearb. von E. Schaur, 1979
- (22) Ellsäcker, I.; Hennicke, J.; Reiner, R.: Projektbereich Architektur: Prozesse Leichtbau. Arcus 1985, 62 - 69
- (23) Bloom, A.J.; Chapin, F.S.; Mooney, H.A.: Resource limitation in plants - an economic analogy. Ann. Rev. Ecol. Syst. 16, 363 - 392, 1985
- (24) Distelbarth, H.; Kull, U.: Physiological investigations of leaf mucilages II. Israel J. Bot. 34, 113 - 128, 1985
- (25) Blum, R.; Fobo, W.: Über die Mechanik des Druckholzes. Arcus 1985, 278 - 283
- (26) Fobo, W.: Über die Mechanik des Zugholzes. Arcus 1986, 90 - 94
- (27) Sander, L.M.: Fractal growth processes. Nature 322, 789 - 793, 1986
- (28) Mandelbrot, B.: The fractal geometry of nature. San Francisco 1982
- (29) Hagel, J.: Vom Werden des Stuttgarter Westens. Naturräumliche und historische Grundlagen. In: Von der Gründerzeit zur Gegenwart. Beiträge zum Stuttgarter Westen I, Stuttgart 1983, 13 - 51
- (30) Neomario, T.H.: Geschichte der Stadt Rom, Band II. Kiel o. J.
- (31) Kiepert, H.; Huelssen, Gh.: Formae Urbis Romae Antiquae. Berlin 1919
- (32) Brinckmann, A.E.: Baukunst des 17. und 18. Jahrhunderts in romanischen Ländern. Handbuch der Kunstwiss., Berlin 1919
- (33) Brinckmann, A.E.: Ein römischer Stadtplan von 1748. In: A.E. Brinckmann, Stadtbaukunst. Handbuch der Kunstwiss., Ergänzungsband. Berlin 1920