Pflanzen als natürliche Konstruktionen – oder das Prinzip Leichtbau

Ulrich Kull, Astrid Herbig

Plants as Natural Constructions: or – the Principle of Lightweight Structures *Plants assume an important position among natural constructions. Because land plants are stationary, it can be assumed that there are analogies to the architectural achievements of man. Thus for the study of natural constructions investigations of the structural characteristics of plants are of great significance. This article describes the aspects of plant structure (involving land plants only) which are being worked on the most and the investigations which have begun on the study of natural constructions within the framework of the Special Field of Research 230.*

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. 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 natürlicher Konstruktionen wir im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 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]. Kleine, 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 somit auch eine Formbildungsfunktion.

Die natürliche Konstruktion Pflanze ist, was die konstruktive Seite und deren Beziehung zur Formbildung betrifft, lange 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 zur 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 Weiden-Typs mit weitausladender Krone und häufig waagerechten 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]. 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 gar kein Beispiel aus dem Pflanzenreich [8]. Manche der Architektur-Typen erscheinen nur wenig voneinander verschieden und werden vor allem aus botanischen Gründen getrennt, andere führen zu völlig unterschiedlichem Bau der Organismen. Es sei erwähnt, daß es auch andere Modelle zur Klassifizierung pflanzlicher Verzweigungssysteme gibt, die zum Teil die funktionelle Seite 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 Unterschiede genetisch festgelegt; dies allein kann schon zu sehr verschiedenen Proportionen führen. 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. Wie 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 mechanische Eigenschaf-

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; Tenerifa); c) Kokkerboom (Aloe dichotoma; Namib-Wüste); d) Essigbaum (Rhus typhina, gepflanzt in Mitteleuropa).

1 Different trees of the same architectural type (tuft-like arrangement of the leaves; formation of an inflorescence leads to subsequent fork-like branching; (Leeuwenberg's model): a) Senecio Keniodendron (Mt. Kenya); b) Dracaena draco (Tenerife); c) Aloe dichotoma (Namib Desert); d) Tanner's sumac, Rhus typhina (planted in Central Europe).

ten, wird aber ein ziemlich abweichender Eindruck erweckt.

Die Gestaltbildung erfolgt bei größeren Pflanzen wie z. B. Bäumen durch die Reiteration festliegender Bauprinzipien entsprechend einer Addition gleichartiger *Moduln* [8, 12]. Eine Pflanze 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 festsitzenden Kolonien leben und in der Evolution eine entsprechende Modul-Konstruktion entwickelt haben (Bryozoen, Graptolithen, mit gewissen Einschränkungen auch Korallen). Wie physiologische Untersuchungen ergaben, stehen die Moduln vor allem in Kooperation und weniger in Konkurrenz zueinander [13]. Das Modulprinzip ermöglicht das Absterben einzelner Einheiten, ohne daß der Gesamtorganismus zugrundegehen muß. Dies ist der »damage tolerance« in der Leichtbautechnik vergleichbar.

Gerade bei langlebigen Landpflanzen ist ein solches partielles Absterben oft ein normaler Vorgang in der Entwicklung [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; als Beispiel für letztere der klassische griechisch-dorische Tempel.

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 nur verschiedene relativ gute Konstruktionen geben. 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 (Abb. 1). Weiterhin muß das genetische Programm so beschaffen sein, daß die ortsfeste Pflanze auf Veränderungen der Umweltbedingungen zu reagieren vermag, wenn auch unter extremen Verhältnissen durch partielles Absterben. Aus diesem Grunde kann die Gestalt einer Pflanze nie völlig genetisch festgelegt sein; alte Bäume sind Individuen von je eigener Gestalt, in der die individuelle Geschichte zumindest teilweise noch ablesbar ist.

Quanitative Untersuchungen

Die Untersuchungen der Festigkeitseigenschaften von pflanzlichen Zellen und Geweben wurde im vorigen Jahrhundert durch Schwendener begründet [14, 15]. Viele der damals gemessenen Werte sind in Tabellenwerke eingegangen. In den ersten Jahrzehnten unseres Jahrhunderts hat Rasdorsky [16] die Vorstellungen Schwendeners erweitert und zum Teil korrigiert. Auf Rasdorskys Vorstellungen über die Verbundbauweise fußen alle modernen pflanzenmechanischen 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 [17]. Überlegungen zur Abhängigkeit der Biegesteifigkeit vom anatomischen Aufbau der Pflanze, wie sie zuerst von Rasdorsky vorgelegt wurden, können zu einer Klassifizierung der Pflanzen aufgrund der anatomisch festgelegten Konstruktionsprinzipien herangezogen werden. Die Grundzüge einer solchen Klassifizierung

hat Mosbrugger [18] 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, [19, 20]. 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:

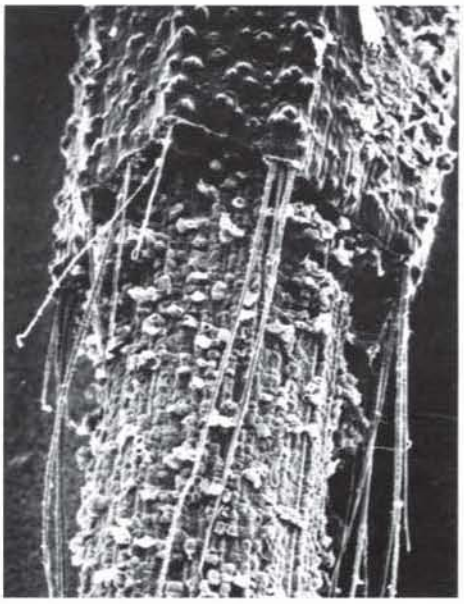
$$\text{Bic} = \frac{\text{Masse}}{\text{Kraft} \times \text{Weg}} \left[\frac{\text{g}}{\text{Nm}}\right]$$

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:

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

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.

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 desen 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. Als Beispiel zeigt (Abb. 2) ein Bruchbild des Rutenstrauches *Ephedra*.



2 Bruch einer Ephedra-Sproßachse bei Zugbelastung (Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme). Der Bruch erfolgt im Grundgewebe, der zentrale Holzkörper bleibt intakt. Kaum verholzte Sklerenchymfasern des Rindengewebes behalten beim Bruch ihre Lage.

2 Fracture of a shoot axis of Ephedra because of tension loading (photo from a scanning electron microscope). The fracture occurs in the basic tissue; the central body of wood remains intact.

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 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 Gesamtenergieinhalt 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 Aufwandskennwerte, die man als die konstruktive Wirtschaftlichkeit K bezeichnen kann:

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

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. Die Pflanze arbeitet jeweils so ökonomisch wie möglich; die Anwendbarkeit der ökonomischen Theorie auf die natürliche Konstruktion Pflanze ist neuerdings dargestellt worden [21].

Leichtbau und Pneus bei Pflanzen

Die tragende Masse wird bei jungen Pflanzen und wurde gleicherweise 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) abgelau-

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

3 Pachysandra: the same plant in a normal state (taut pneumatic state) and suffering from lack of water after treatment with cold (interior pressure of the pneumatic has dropped).

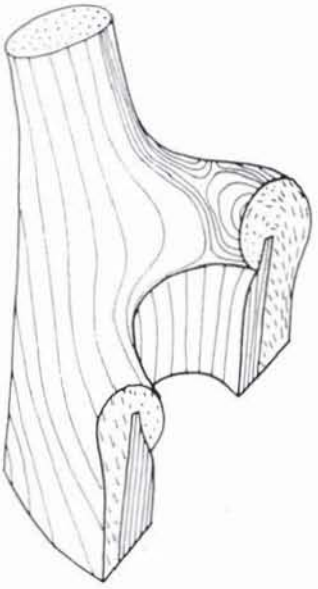
fen. Bei den Blütenpflanzen kam es dann umgekehrt wieder zur Bildung kleiner, krautiger und kurzlebiger Arten aus verholzten Ausgangsformen. Es ist sinnvoll, das *Prinzip Leichtbau* zunächst bei nicht bzw. wenig verholzenden Pflanzen zu untersuchen. Bei den Holzpflanzen ergeben sich wegen der größeren erforderlichen Kräfte methodische Probleme. Die unverholzte Pflanzenzelle ist biomechanisch als Pneu zu beschreiben; nach Verholzung der Wand liegt ein erhärteter Pneu vor. Die Zugfestigkeit der Zellwände ist auf molekularer Ebene 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 zureichende 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. 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 Ausfachung eines durch die Cellulosefasern gebildeten Fachwerks sprechen. Eine merkwürdige und weitgehend unklare Stellung haben Schleimzellen und Schleimgänge in 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 [22]; ob die Schleimzellen auch eine konstruktive Funktion haben 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 Welkeerscheinungen. Sobald wieder Wasser zugeführt wird, erfolgt eine rasche Regeneration der Pneustruktur der ganzen Pflanze (Abb 3). – 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.

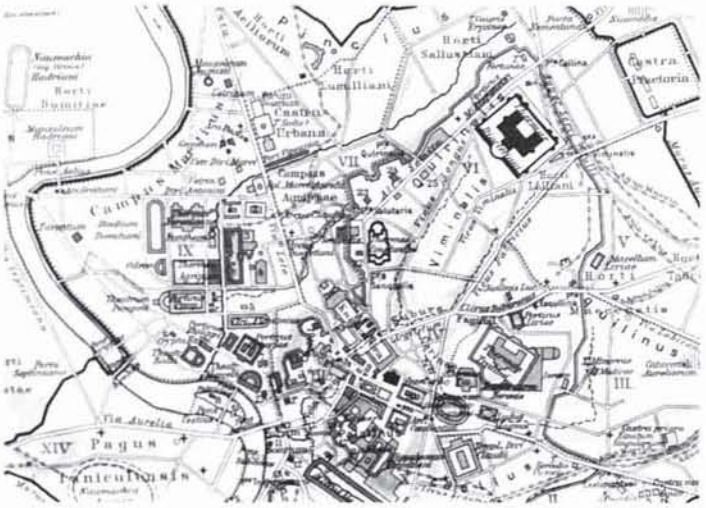
Dynamik pflanzlicher Konstruktionen

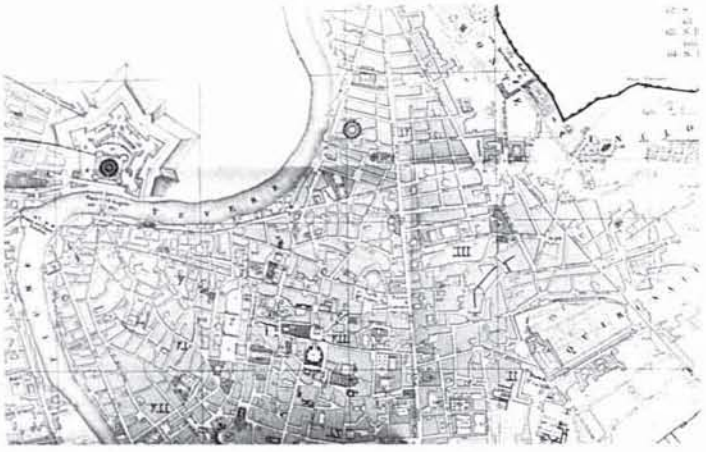
Das *Prinzip Leichtbau* bezieht sich zunächst auf das statische Bild der Pflanze. Nun ist diese aber als lebendiger Organismus in dauernder Veränderung begriffen. Man darf die Dynamik des Vorgangs, der die Konstruktionen liefert, nicht aus dem Auge verlieren. Im SFB 230 sind bereits Untersuchungen, die auch in diese Richtung zielen, am sogenannten Reaktionsholz von Bäumen durchgeführt worden [23, 24]. Nun kann man die Dynamik in der Regel 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 konstruktiven Veränderungen ermitteln. Wir bearbeiten daher solches Material (freundlicherweise zur Verfügung gestellt von Herrn Gartenarchitekt G. Sinn), wobei die Untersuchung der mechanischen Eigenschaften der Zusammenarbeit mit Ingenieuren (Dr. Wessolly, Teilprojekt D 6 des SFB) bedarf. Als konkretes Beispiel mögen hier die bisherigen Befunde vom Stammkopf einer Roßkastanie dienen, der nach dem Absägen vor etwa 25 Jahren die Schnittstelle zunächst überwallte und an dem ein Seitenzweig heranwuchs und erstarkte und so eine Ersatz-Achse ausbildete (Abb. 4). 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 be-

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

4 Trunk of a horse chestnut with old wood, rounding and base of a branch which became the replacement axis. The direction of the grains in the wood is indicated (drawing by A. Herbig).







5 Stadtplanausschnitte von Rom:
a) Straßenverlauf in der Spätantike
b) Stadtplan von 1551 (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 Emmannuele durch die Altstadt zum Tiber hin existiert noch nicht.

5 Details from the town plan of Rome:
a) Plan of the streets in late antiquity b) Town plan from 1551 (from Neomario, Bibliography Nr. 28). Near the banks of the Tiber the Via Giulia is recognizable as the first street cut through the medieval city. From the Piazza del Popolo (upper edge of the picture) there are three radiating straight streets which had their origin in the classical street arrangement.
c) Detail from a town plan from 1864 (from Foerster, 1864). The Quirinal (right) is crossed by the Via Sistina and the Via Quirinale, which run similarly to classical streets but are newly laid out. The cut-through of the Corso Vittoria Emanuele through the old city to the Tiber does not yet exist.

vorzugt. Alsbald 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 dieses Achsenersatzes autokatalytisch. Somit werden die Elemente des nunmehr neu gebildeten Holzes allmählich immer stärker auf diese Transportrichtung ausgerichtet. Es entstehen durch starke Jahreszuwüchse 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 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 [25, 26]. Mit dem Erstarken der Ersatzachse 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. Besonders eindrucksvoll ist ein Vergleich mit einem Stadtorganismus der durch längerzeitigen starken Einwohnerverlust schrumpfte und dann allmählich wieder heranwuchs. Dies zeigt in beispielhafter Weise die Stadtentwicklung Roms (Abb. 5). Nachdem die Stadt im Mittelalter klein geworden war, bestand fast nur noch ein System unregelmäßiger Gassen in einem kleinen Teil des Alten Rom anstelle des regelmäßigen Hauptstraßen-Netzes der spätrömischen Kaiserzeit [27, 28]. 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 [29] 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 [30] 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 [20]. Die Analogien zur untersuchten Entwicklung der dekapitierten Baumachse sind augenfällig.

Literatur

[1] Otto, F (und Mitarbeiter). Naturliche 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 Uber Wachstum und Form Arcus 1985, 56–61
[5] Gutmann, W F Das neue Evolutionskonzept Erweiterung oder Neubegrundung? Biol Rdsch **23**, 225–239, 1985
[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] Luck, J, Luck, H B Modellbildungen zur pflanzlichen Verzweigung Ber dtsch Bot Ges. **95**, 75–97, 1982
[10] Mc Mahon, 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] Bell, A D The simulation of branching patterns in modular organisms Phil Trans R Soe Lond **B 313**, 143–159, 1986
[13] Hardwick, R C Physiological consequences of modular growth in plants Phil Trans R Soe. Lond. **B 313**, 161–173, 1986
[14] Schwendener, S Das mechanische Prinzip im anatomischen Bau der Monocotylen mit vergleichenden Ausblicken auf die ubrigen Pflanzenklassen Leipzig, 1874
[15] Schwendener, S Die Festigkeit der Gewachse. Jh Ver vaterl Naturkunde, Wurtt **34**, 76–81, 1878
[16] Rasdorsky, W Uber die Baumechanik der Pflanzen, Biol Gen **1**, 63–94, 1929 u Biol Gen **12**, 359–398, 1937
[17] Nachtigall, W Pflanzenbiomechanik Konzepte SFB 230, Heft 24, 1986
[18] Mosbrugger, V Die Bauform bei Landpflanzen In Konzepte SFB 230, Heft 16, 145–149, 1986
[19] Grundlagen Form-Kraft-Masse 1. IL 21, bearb von E Schaur, 1979
[20] Ellsasser, I., Hennicke, J, Reiner, R Projektbereich Architektur Prozesse Leichtbau Arcus 1985, 62–69
[21] Bloom, A. J, Chapin, F. S, Mooney, H A. Resource limitation in plants – an economic analogy Ann Rev Ecol Syst **16**, 363–392, 1985
[22] Distelbarth, H., Kull, U. Physiological investigations of leaf mucilages, II Israel J Bot **34**, 113–128, 1985
[23] Blum, R, Fobo, W Uber die Mechanik des Druckholzes. Arcus 1985, 178–183
[24] Fobo, W.. Uber die Mechanik des Zugholzes Arcus 1986, 90–94
[25] Sander, L. M.: Fractal growth processes. Nature **322**, 789–793, 1986
[26] Mandelbrot, B The fractal geometry of nature San Francisco 1982
[27] Neomano, T H Geschichte der Stadt Rom, Band II. Kiel, o J
[28] Kiepert, H, Huelsen, Ch.: Formae Urbis Romae Antiquae Berlin 1919.
[29] Brinckmann, A E. Baukunst des 17 und 18 Jahrhunderts in romanischen Landern Handbuch der Kunstwiss, Berlin 1919
[30] Brinckmann, A. E Ein romischer Stadtplan von 1748. In. A. E. Brinckmann, Stadtbaukunst. Handbuch der Kunstwiss, Erganzungsband. Berlin 1920