

Computer simuliert Pflanzenwachstum: Die grüne Zeitmaschine

Was sieht in 15 Jahren in einer Wohnstraße besser aus: Platanen oder Pappeln? Einem französischen Forschungsinstitut gelang es jetzt, dieser Frage mit einem Computerprogramm nachzugehen. Klare Computerausdrucke zeigen an, wie sich eine Bepflanzung in den folgenden Jahren entwickeln wird. Denn ganz willkürlich geht es beim Wachstum der Pflanzen nicht zu – man kann einiges errechnen.

Seite 46

Lyme-Krankheit durch Zecken: Der verhängnisvolle Biß

Mindestens zwei Millionen Menschen in der Bundesrepublik Deutschland sind mit Lyme bereits infiziert. Eine Epidemie rollt an: Am Anfang jeder Neu-Infektion steht stets ein Zeckenbiß. Besonders gefährlich ist der Biß der Zecken-Nympe, die nur stecknadelkopfgroß ist. Während der Parasit Blut saugt, wandern krankheitserregende Bakterien aus ihm in den Blutkreislauf des Opfers. Oft erst lange danach stellen sich die vielge-

sichtigen Symptome der Lyme-Krankheit ein: Fieber, Erschöpfung, Gelenkentzündung, Herzattacken und sogar Totgeburten.

Seite 54

Die Nummer 1: Gallium-Arsenid

Es ist ein neuer Stoff, aus dem die Sieger gebaut werden. In der Mikroelektronik startet Gallium-Arsenid zur Verfolgungsjagd auf das allgegenwärtige Silizium. Gallium-Arsenid ist schneller, ermöglicht Bauteile im Millimeterwellenbereich und kann Licht direkt empfangen und aussenden. Das macht die Chips aus Gallium-Arsenid für ein großes Segment der technischen Anwendung interessant. Aber: Noch kann es nur in hochspezialisierten „Nischen“

eingesetzt werden – da aber überraschend erfolgreich.

Seite 36



Gratik-Büro 4 D

Sozialwissenschaften

- Geistig behinderte Kinder: Pädagogik statt Therapie** 100
Jürgen-Peter Stössel

Technik

- Trends der Bildanalyse** 28
Revolution auf der Glasfaser 29
Mehr Schärfe durch Wackeln 32
Leichter Druck auf Raser 32
Japanischer Stützpunkt 32
Filigran und lichtgestaltet 33
Elektrische Blindenschrift 34
Lexikon im Stecknadelkopf 34
Gallium-Arsenid: Das Zeitalter der Superchips 36
Hans S. Rupprecht/Roland Diehl
Tschernobyl – drei Jahre nach der Katastrophe: Besuch im Sarkophag 88
Yuri Kanin

Umwelt

- Fast eine Zeitreise** 15
Sauber auf dem See 17
Recht der Gewohnheit 17
Leichtbausteine aus Müll 33

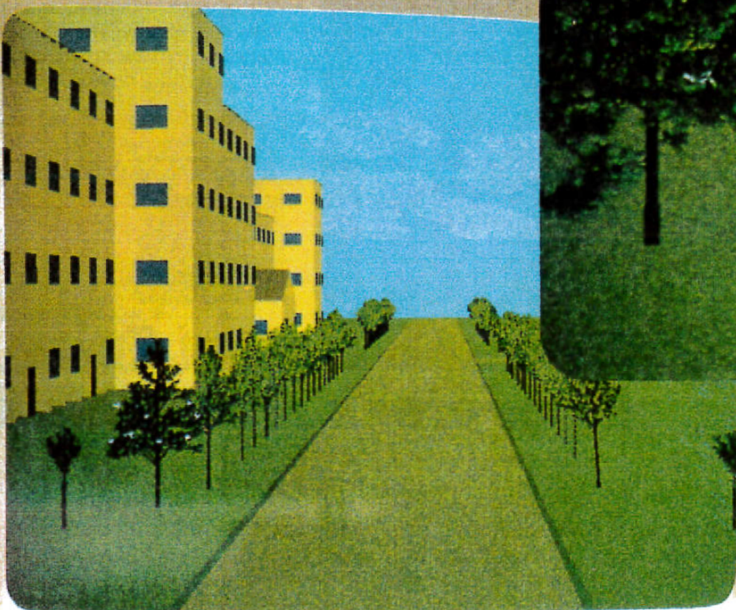
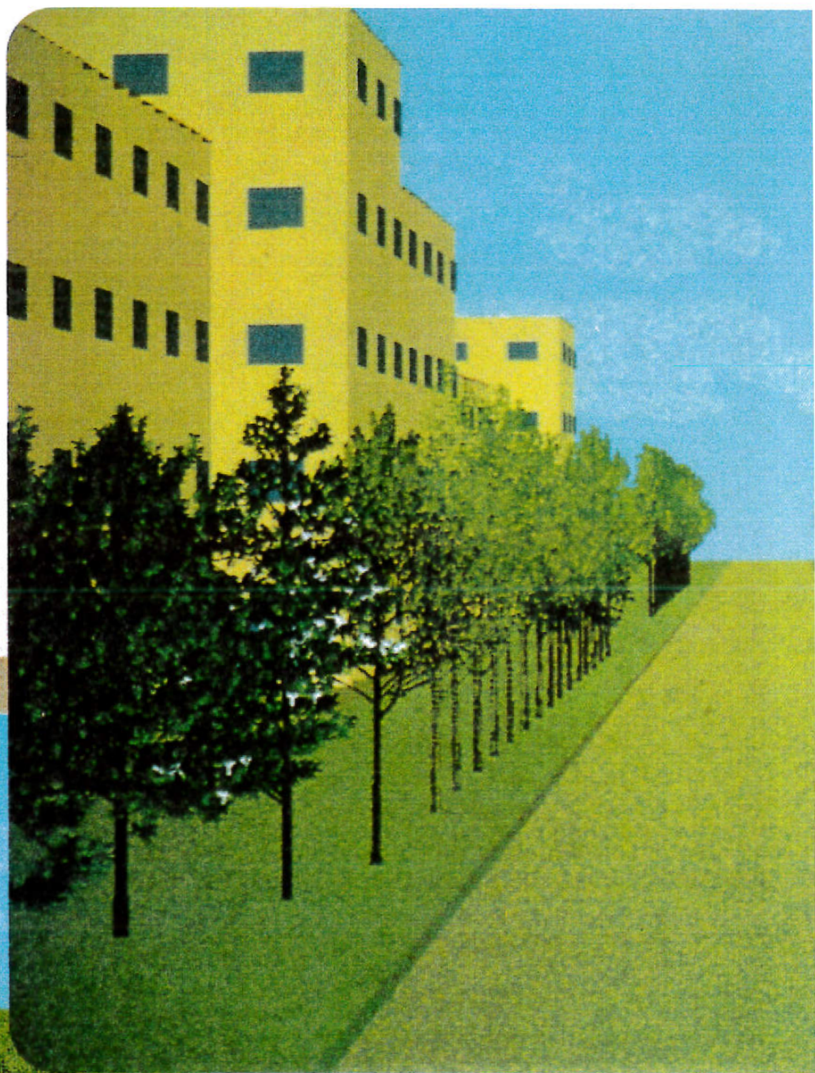
Rubriken

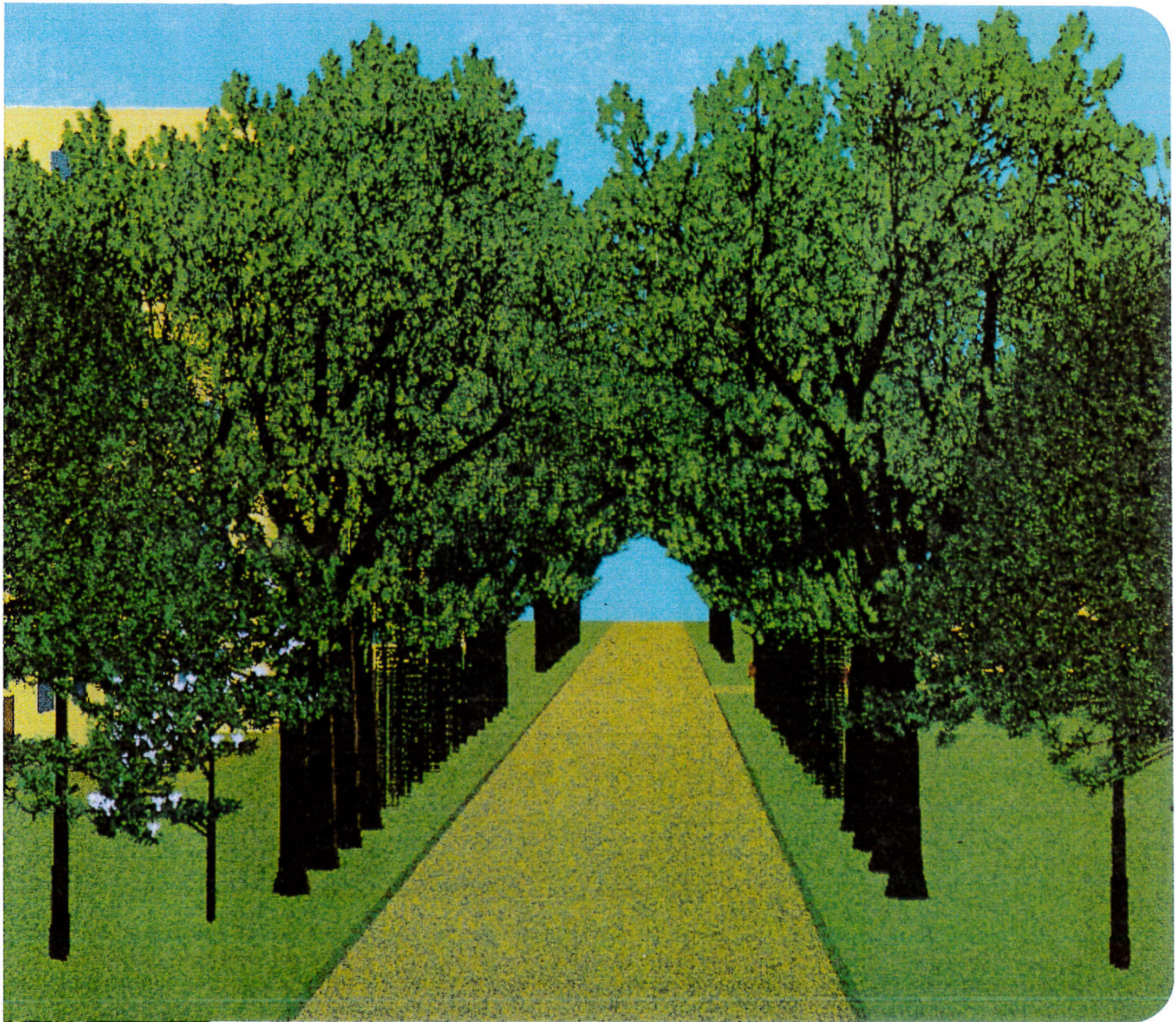
- Editorial 3
Leserbriefe 6
Akzent 12
persönlich 21
US-Akzent 24
Innovation 28
Presse international 35
Astronomie heute 108
Bücher 110
Wissenschaft vor 100 Jahren 114
Das Kabinett 115
Dokumentation 119
Impressum 121
Vorschau 122

Computer simuliert Pflanzenwachstum: Die grüne Zeitmaschine

Botanik, Mathematik und Datenverarbeitung standen Pate: An einem französischen Forschungsinstitut gelang es, Pflanzenwachstum perfekt im Computermodell zu simulieren. Verästelungen, Blattwerk, Blüten, Früchte werden naturgetreu wiedergegeben, ebenso das Wachstumstempo. Der Betrachter sieht in die Zukunft: Welche Allee-Bepflanzung wird mehr hermachen – Platane oder Pappel?

Philippe de Reffye/Claude Edelin/Marc Jaeger





Ganz schön willkürlich scheint es bei den Pflanzen zuzugehen. Da ist ein Stiel oder Stamm, manchmal sogar mehrere, ferner eine Reihe von sich weiter verästelnden Verzweigungen sowie eine oft beliebig erscheinende Anzahl von Blütenständen und Früchten. Die Architektur einer Pflanze scheint unvorhersagbar zu sein.

Es mag daher verwegen klingen, wenn jemand behauptet, wachsende Pflanzen per Computer simulieren zu

können – und zwar mit realistischen, botanisch korrekten Ergebnissen. Wir freuen uns, daß dies unserer Arbeitsgruppe am CIRAD in Montpellier gelungen ist. CIRAD, das Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement, ist ein international besetztes landwirtschaftliches Forschungszentrum.

Unser Computermodell für das Pflanzenwachstum stützt sich einerseits auf Forschungsergebnisse aus der Botanik und zum anderen auf mathemati-

Wie im Zeitraffer huschen die Jahre vorbei: So verändern Begrünungsmaßnahmen das Gesicht einer Straße. Zerbrechlich erscheinende Jungbäumchen (ganz links) können sich im Verlauf von 15 Jahren zu einem veritablen

Gewölbe auswachsen, das die Häuserfassade völlig verdeckt (ganz rechts). Das Grafikprogramm AMAP simuliert dies für unterschiedliche Baumarten – hilfreich für Stadtplanung und Landschaftsarchitektur.

Informationswissenschaften

sche Mittel, vor allem auf die Wahrscheinlichkeitsrechnung. Daraus entwickelten wir ein Grafikprogramm mit Namen AMAP (Atelier de modélisation de l'architecture des plantes).

Da die damit erzeugten Bilder keine Produkte zeichnerischer Phantasie sind, sondern in aller Striktheit ausschließlich auf naturwissenschaftlichen Erkenntnissen und Modellvorstellungen beruhen, eignet sich diese Art der Computersimulation sehr für den praktischen Einsatz.

Zum Beispiel in der Land- und Forstwirtschaft: Wie viele Früchte ein Baum trägt, hängt direkt von dem Prozentsatz ab, zu dem aus den Blütenständen tatsächlich Früchte werden. Maßgebend ist weiterhin die Anzahl der Blüten, die der Baum zu einem bestimmten Zeitpunkt der Saison angesetzt hat, sowie ganz allgemein seine Wachstumsgeschwindigkeit und seine Geometrie.

Nun, da sich dies alles im Computermodell simulieren läßt, lassen sich naturwissenschaftlich begründete Vorhersagen über den Ertrag treffen: Vielleicht ein Werkzeug, um die Selektionskriterien für die Züchtung ertragreicherer Sorten gezielter als bisher festzulegen.

Ähnlich attraktive Einsatzmöglichkeiten bieten sich in Architektur, Stadtplanung und Landschaftsgärtnerei. Beispielsweise bei der Begrünung von Innenhöfen, Plätzen oder Straßenzügen kann der Planer sich im vorhinein – buchstäblich – ein Bild davon machen, wie sich die vorgesehene Bepflanzung in einigen Jahren dem Auge des Betrachters darbieten wird. Er kann gegebenenfalls auf dem Bildschirm die Pflanzen umgruppieren oder andere Pflanzenarten einsetzen und stets überprüfen, wie sich diese Begrünungsmaßnahmen künftig auswirken werden.

Zur botanischen Seite unseres Computermodells haben zu Beginn der siebziger Jahre F. Hallé, Universität Montpellier, und R. A. A. Oldeman, Universität Wageningen in den Niederlanden, die Grundlagen erarbeitet. Dieses Team, später verstärkt durch den amerikanischen Botaniker P. B. Tomlinson, wies nach: Sämtliche gegenwärtig existierenden Baumarten lassen sich – trotz ihres so unterschiedlichen Erscheinungsbildes – in nur 23 architektonische Klassen einteilen.

Solch ein gemeinsames Bauprinzip

wird erkennbar, wenn man das räumliche und zeitliche Auftreten der unterschiedlichen Organe und Bestandteile einer Pflanze während ihres Lebenszyklus in Beziehung zueinander bringt.

Das grundlegende Strukturelement ist der Stamm, die sogenannte Sproßachse. An der Spitze der üblicherweise zylindrischen Sproßachse findet sich ein

Meristem, eine Kolonie von teilungsbereiten Zellen. Dieses embryonale Pflanzengewebe ist die wachstumsaktive Zone. In der Überwinterungsform präsentiert sich das Meristemgewebe meist in der Form einer Knospe.

Wo neue Blätter ansetzen, verdickt sich die Sproßachse. Der Botaniker spricht hier von einem Knoten, latei-



Realistische Erntevorhersage am Beispiel des Lychee-Baums: Das Computerprogramm erstellt ein naturgetreues Bild der Pflanze, mit der statistisch zu

erwartenden, charakteristischen Anzahl und Verteilung von Blütenständen (oben) wie auch von Lychee-Früchten (unten).



nisch „nodus“. Er entsteht durch seitliches Wachstum des Meristem-Gewebes. Der Stamm- beziehungsweise Sproßachsen-Abschnitt zwischen zwei aufeinanderfolgenden Knoten, also zwischen zwei Blattansätzen, heißt „Internodium“ oder Stammglied.

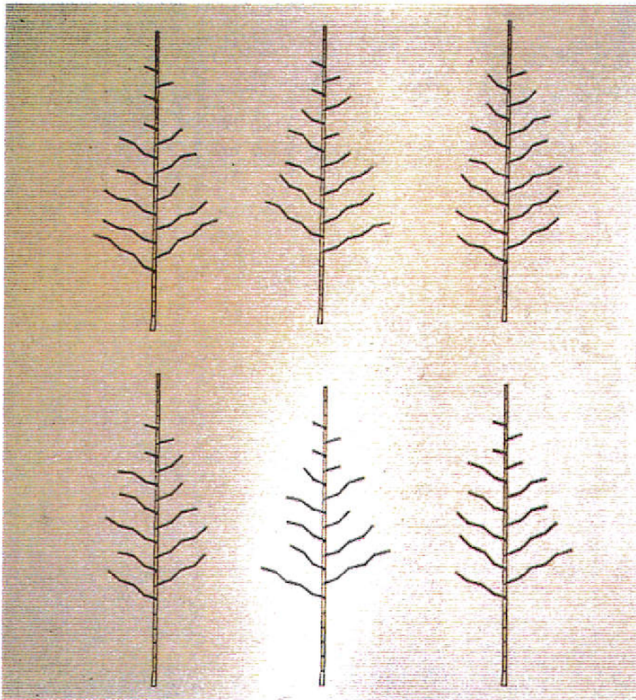
Der Stamm eines Baumes oder ein beliebiger Ast läßt sich, nach dem Bau-

dingung von Seitenachsen nach sich ziehen. Ein weiteres Charakteristikum, um ein verzweigtes System von einem anderen zu unterscheiden, ist die relative Ausrichtung der verschiedenen Sproßachsen.

Aus ganz bestimmten Kombinationen zwischen den vier Kriterien Längenwachstum, Verzweigung, Lebens-

dauer sowie Orientierung der Sproßachsen leiten sich die 23 architektonischen Modelle ab, in die sich sämtliche stammbildenden Pflanzen des Erdballs einteilen lassen.

Unabhängig von dieser botanischen Modellvorstellung haben wir ein mathematisches Wachstumsmodell entwickelt. Das Erscheinungsbild einer Pflan-



Nach der gängigen Arbeitsweise des Computer aided design (CAD) wird zunächst ein zweidimensionales Drahtmodell der betrachteten Pflanze er-

stellt (oben links), danach ein dreidimensionales Drahtmodell (oben rechts). Aus einer Formen-Datenbank abgerufen, sorgen dann kolorierte

Vieleckflächen für räumlichen Eindruck (unten). Simulierter Lichteinfall und Schattenwurf vervollkommen die Computer-Baumwollpflanze.

kastenprinzip, in eine lineare Abfolge einzelner Stammglieder einteilen – die Grundelemente des Längenwachstums.

Das zweite wichtige Element, das die räumliche Struktur einer Pflanze bestimmt, ist die Verzweigung. Die meisten Pflanzen weisen Verzweigungen auf, deren jede wiederum eine neue Sproßachse darstellt. Eine Mutterachse kann sich in zwei Tochterachsen gabeln, indem sich das Meristemgewebe an ihrer Spitze der Länge nach teilt. Tochterachsen entstehen ebenso aus Meristemen, die sich seitlich vom Sproßscheitel ableiten.

Neben Längenwachstum und Verzweigung kommt ein drittes Element ins Spiel: die relative Lebensdauer der verschiedenen Sproßachsen. Ein Wachstumsstopp der Hauptachse kann die Bil-



ze ist das Ergebnis der Aktivität ihrer Meristeme. Deshalb versuchten wir, das Funktionieren dieser Keimgewebe in mathematische Ausdrücke zu fassen.

In einem zweiten Arbeitsgang mußten wir Wahrscheinlichkeitsrechnungen anstellen. Denn unsere Freilanduntersuchungen, Mitte der siebziger Jahre an der Kaffeesorte Robusta begonnen und damals rein landwirtschaftlich motiviert, hatten uns klargemacht: Das Wachstum eines Pflanzen-Individuums ist stark von Zufälligkeiten geprägt. Es ist unmöglich, einem bestimmten Meristem anzusehen, ob es in Längenwachstum übergehen, sich verzweigen oder das Wachstum einstellen wird.

Eines ist allerdings den drei Faktoren Längenwachstum, Verzweigung und Wachstumsstopp gemeinsam: Sie hän-

gen von einem Zeitfaktor ab. Der Zeitraum, der notwendig ist, um ein weiteres Stammglied zu bilden, stellt die elementare Zeiteinheit der betreffenden Pflanze dar – ihren Zeittakt.

Jedes Meristem verfügt über eine Art innere Uhr. In ziemlich regelmäßigen Abständen signalisiert die Wachstums-Maschinerie im Meristem, daß sie bereit

sich um ein weiteres Bauelement.

Diese Alternative läßt sich in mathematische Formensprache fassen: Die Wahrscheinlichkeit, mit der bei jedem Zeittakt der inneren Uhr ein bestimmtes Meristem wächst, sich verzweigt oder aber abstirbt, beträgt entweder 0 oder 1. In einem zweiten Schritt muß man das Verhalten der Meristeme stati-

Stammlängen und die Anzahl der Zwischenglieder pro Stamm ausgezählt – bei je hundert Pflanzen.

Was dabei herauskam, war stets eine charakteristische statistische Verteilung. Mit einem gängigen mathematischen Verfahren haben wir von der gemessenen Stammglieder-Verteilung auf die Art der dahinterstehenden Verteilungsfunktion zurückgeschlossen. Das war beispielsweise eine Poisson- oder eine Binomialverteilung.


Auch die Verzweigungshäufigkeit und das Absterben von Sproßachsen haben wir bei den jeweils 100 Pflanzenindividuen in derselben Weise erfaßt: zunächst Messung und Auszählung, dann Suche nach der dazu passenden statistischen Verteilung.

Diese Verteilungen hängen ihrerseits von den Wechselwirkungen zwischen Pflanze und Umgebung ab: beispielsweise von Art und Menge des eingesetzten Düngers, von der Sonneneinstrahlung. Auf Versuchsfeldern haben wir durch umfangreiche Messungen erkundet, in welcher Weise diese unterschiedlichen Rahmenbedingungen auf das Wachstum der betreffenden Pflanzenart Einfluß nehmen.

Das Computermodell, das aus dieser Zusammenführung von botanischer und mathematischer Modellierung entstand, erlaubt den Rückschluß von der Architektur eines Baumes auf sein Wachstumsverhalten. Das Grafikprogramm AMAP, welches wir entwickelt haben, setzt die numerischen Daten in Bilder um.

Das Bild der Pflanze wird nach den gängigen Techniken des Computer aided design (CAD) aufgebaut: Grundlage ist ein aus Linien erstelltes „Drahtmodell“, die direkte Wiedergabe der Struktur der errechneten Pflanze. Dieses Drahtskelett wird nach und nach mit grafischen Elementen „bekleidet“, die in einer Formendatenbank gespeichert sind: Stammglieder, Blätter, Blüten und Früchte.

Durch räumliche Koordinaten eindeutig definiert, lassen sich diese Computerpflanzen in allen drei Raumrichtungen abbilden, unter beliebigem Blickwinkel. Simulierter Lichteinfall und Schattenwurf ergeben einen realistischen, naturgetreuen Eindruck.

So ist sie zustande gekommen – die ungewöhnliche Hochzeit zwischen Botanik, Mathematik und Informatik. 



Mittagshitze flirrt über der Plantage, in der in Reih und Glied die Baumwollpflanzen stehen: künstliche Szenerie, erzeugt vom Computerpro-

gramm AMAP. Die Wachstumsbedingungen lassen sich vorgeben – etwa Art und Menge des Düngers und die Stärke der Sonnen-Einstrahlung.

ist, ein neues Stammglied zu produzieren. Der interne Zeitgeber führt dann jedesmal einen Wachstumstest durch.

Wenn das Ergebnis negativ ausfällt und das Meristem nicht „anspringt“, beispielsweise aufgrund von ungünstigen Umweltbedingungen, wird kein neues Stammglied produziert. Fällt dagegen der Test positiv aus, wächst ein zusätzliches Stammglied: Die betreffende Achse verlängert

sich und beschreibt. Hierfür liefert der architektonische Modell-Ansatz von Hallé und Oldeman die botanischen Zusammenhänge.

Zu einer quantitativen Aussage über eine bestimmte Pflanzenart kommt man, wenn man die Aktivität der Meristeme in einer Population von genetisch gleichen und gleich alten Pflanzen bestimmt. So haben wir – beispielsweise bei Kaffee, Lychee, Baumwolle – die



Dieser Beitrag entstand in Zusammenarbeit mit der European Journals Group for Science and Technology, wo bild der wissenschaft Mitglied ist, als Euroartikel. Er erschien zuerst in unserer französischen Partnerzeitschrift „La Recherche“ (Copyright La Recherche 1989).

Das Autorenteam: Dr. Philippe de Reffye ist Agrar-Ingenieur und leitet die Abteilung Computermodelle am internationalen landwirtschaftlichen Forschungszentrum (CIRAD) in Montpellier. In derselben Abteilung arbeitet der Informatiker Dr. Marc Jaeger. Der Dritte im Bunde, Botaniker Dr. Claude Edelin, ist am Institut für tropische Botanik II in Montpellier tätig.