

---

# 1 Computergenerierte Pflanzen

## Einleitung

---

Seit über dreißig Jahren beschäftigen sich Botaniker und Informatiker mit der synthetischen Erzeugung von Bildern natürlicher Objekte. Bereits im Jahr 1966 wurde das erste Verfahren zur Simulation einer Verzweigungsstruktur mit dem Computer vorgestellt. Es verwendete so genannte zelluläre Automaten, eine Anordnung quadratischer Zellen auf einem Gitter, die durch die Steuerung des Programms verschiedene Zustände annehmen können. Von einer Startzelle aus wuchs das Modell nach einem einfachen Regelmechanismus in die Nachbarzellen und ließ, geeignete Regeln vorausgesetzt, eine Verzweigungsstruktur entstehen. Spätere Modelle arbeiteten im Gegensatz zu diesen diskreten Modellen kontinuierlich. Eine Vielzahl verschiedener Verfahrensweisen entstand, und parallel zur Entwicklung der Rechner nahm die Komplexität und visuelle Qualität der Ergebnisse bis zu einem Punkt zu, an dem es schwierig wurde, Computersimulationen von Fotografien zu unterscheiden.

Heute werden synthetisch erzeugte Naturelemente an vielen Stellen in der Computergraphik und in verwandten Gebieten eingesetzt. Pflanzen sind der Bestandteil vieler Computerbilder, Außenszenen sind ohne natürliche Objekte kaum darstellbar. So sind sie mehr und mehr zum integralen Bestandteil vieler Modellersysteme geworden und müssen den Erwartungen ganz unterschiedlicher Benutzer entsprechen.

Viele Bereiche außerhalb der Informatik profitieren von diesen Modellen: Landschaftsplanern werden Methoden an die Hand gegeben, ihre Planungsergebnisse zu visualisieren, Architekten reichern ihre Simulationen mit computergenerierten Pflanzen an, Botaniker verwenden die Modelle zur Bestimmung physiologischer Parameter, in der Simulationstechnik und Spiele-Industrie werden immer realistischere Pflanzen- und Landschaftsmodelle verwendet.

Der Schwerpunkt dieses Buches liegt auf der Modellierung von pflanzlichem Bewuchs und der damit verbundenen Bilderzeugung. Natürliche Landschaften bestehen aber aus einer Vielzahl von Elementen, die zwar ähnliche mathematische Charakteristika besitzen, sich aber in der Erzeugung und Darstellung unterscheiden können. So bezeichnen die Computergraphiker Objekte wie Gestein, Wolken oder Bäume als Fraktale, dies ist aber nur die Umschreibung

einer wesentlichen geometrischen Eigenschaft, die für die einzelnen Objekte auf unterschiedliche Weise in Verfahren zu ihrer Erzeugung umgesetzt werden muss.

Die Methoden zur Erzeugung von Wolken oder Gebirgen orientieren sich direkt an der den Fraktalen zugrunde liegenden Mathematik. Bewuchs hingegen ist ganz anders zu erzeugen. Hier spielen verschiedenste geometrische Modellieraspekte eine wesentliche Rolle, die fraktalen Eigenschaften der Pflanzen sind allenfalls im rekursiven Aufbau der Modelle wiederzufinden. Was eine Pflanze von der anderen unterscheidet sind weniger die generellen mathematischen Parameter als vielmehr der konkrete detaillierte Aufbau, daher ist die Frage der effizienten Modellierung in diesem Zusammenhang entscheidend und schließt insbesondere interaktive Systeme und deren Bewertung ein.

Die im Folgenden behandelten Aspekte lassen sich in drei Bereiche aufteilen: Verfahren zur Modellierung von Einzelpflanzen, Verfahren zur Modellierung von Pflanzengemeinschaften sowie die Bilderzeugung für synthetische Landschaften. Die ersten beiden Teilbereiche werden sowohl aus botanischer als auch aus computergraphischer Sicht betrachtet.

Hierbei treten allerdings Konflikte darüber zutage, was in der jeweiligen Disziplin als wichtig angesehen wird. So ist ein geometrisches Pflanzenmodell für Botaniker in zweierlei Hinsicht von Interesse: Es erlaubt die visuelle Validierung der zugrunde liegenden Erzeugungsprozesse und es wird benutzt, um mathematische Eigenschaften wie beispielsweise die Lichtaufnahme der Pflanze zu berechnen. Dem visuellen Modell als solchem wird kaum Wert beigemessen.

Ganz anders in der Computergraphik: Das geometrische Modell wird wegen seines visuellen Eindrucks verwendet. Die zugrunde liegenden Prozesse sind nur insofern von Bedeutung, als sie es erlauben müssen, effizient eine komplexe Geometrie zu erzeugen. Die ausschließlich visuelle Bewertung kann sogar dazu führen, dass mit Absicht botanisch inkorrekte Modelle erzeugt werden, um in einer bestimmten Situation einen gewünschten Effekt zu erzielen.

Diese Spannung zwischen den Disziplinen taucht im Folgenden an verschiedenen Stellen auf. Da sich das Buch aber primär an Leser aus dem Bereich Informatik und speziell der Computergraphik richtet, treten die botanischen Aspekte des Öfteren hinter den technischen zurück. So ist die Einführung in Kapitel 2 auch weniger zum Wissenserwerb für Biologen gedacht als zum generellen Verständnis von Lesern aus anderen Fachrichtungen. Das Kapitel ist daher auch minimal kurz gehalten und beinhaltet kaum mehr als das hierfür nötige Schul- bzw. Grundstudiumswissen.

Die technischen Beschreibungen gehen aus demselben Grund stärker in die Tiefe. Kapitel 4 betrachtet alle wesentlichen Ansätze zur Modellierung von Pflanzen per Computer in der Abfolge ihrer Entstehung. Neben dem rein bibliographischen Aspekt tritt durch die Fülle dieser Arbeiten auch die Vielfalt der Lösungsmöglichkeiten hervor. Die späteren Kapitel behandeln die relevanten Fragen der Bilderzeugung. Eine Reihe von Bildern demonstriert die Ergebnisse der verschiedenen Bilderzeugungsverfahren.

Bevor in den einzelnen Kapiteln die Details besprochen werden, soll ein kurzer Überblick die relevanten Fragestellungen vorstellen. In jedem der Teilbereiche bestehen spezifische Probleme bei der Umsetzung der generellen Ansätze in praktisch anwendbare Verfahren. Deren Erwähnung soll dem Leser helfen, die später behandelten Probleme einzuordnen.

## 1.1 Modellierung virtueller Landschaften

In der Botanik wird Bewuchs in verschiedenen Abstraktionsebenen betrachtet. Ausgehend von Einzelpflanzen beschäftigt man sich mit Pflanzenpopulationen, also Ansammlungen von Pflanzen einer Art, die sich zu Pflanzengesellschaften verschiedener Arten zusammenfügen und auf diese Weise Areale (typische Landschaftsformen) bevölkern.

Diese Einteilung macht auch für die Computergraphik Sinn, da die Modelliermethoden für die unterschiedlichen Stufen deutlich variieren. Spielen bei Einzelpflanzen geometrische Details eine große Rolle, so werden schon Pflanzenpopulationen eher aus statistischer Sicht gesehen, während geometrische Eigenschaften wie etwa Abschattungsverhältnisse in den Hintergrund rücken. Bei Pflanzengesellschaften und Arealen verstärkt sich dieser Effekt, hier werden nur noch statistische Aspekte, freilich in Kombination mit biotischen und abiotischen Umweltfaktoren, gesehen.

Wird eine synthetische Landschaft erzeugt, so müssen ausgehend von den Arealen immer genauere Beschreibungen gefunden werden, die schließlich in die geometrische Ausgestaltung jeder einzelnen Pflanze münden. Schon an dieser Stelle kann erahnt werden, welche geometrische und auch gestalterische Komplexität das Gesamtproblem erreichen kann.

Diese Komplexität äußert sich allerdings auch schon bei der Gestaltung von Einzelpflanzen. Die existierenden Ansätze können unterschieden werden in prozedurale und regelbasierte Verfahren. Prozedurale Verfahren sind parametrisierbare Spezialalgorithmen zur Generierung spezieller Modelle, während regelbasierte Methoden eine formale Regelbasis verwenden, die durch Regelanwendung aus einem Startzustand einen komplexen Endzustand erzeugen. Die Vor- und Nachteile beider Ansätze werden analysiert. Es wird ein Verfahren beschrieben, welches die Vorteile beider Verfahren vereinigt, indem es regelbasierte und prozedurale Elemente verbindet.

Da die einzelnen Modellierungsmethoden völlig unterschiedliche Parameter zur Beschreibung von Pflanzen verwenden, stellt sich in diesem Zusammenhang auch die Frage, ob es einen tiefer liegenden, universellen Parametersatz bzw. eine generelle Beschreibung gibt, deren Approximation über die vielen unterschiedlichen Verfahren geschieht. Eine solche Beschreibung muss nicht existieren, schon gar nicht im mathematisch/algorithmischen Sinne. Aber schon eine einfache Methode zur Begrenzung der herstellbaren Formen auf das, was botanisch sinnvoll ist, wäre eine Erleichterung für die Modellierung.

Hat man die geometrischen Daten einer Einzelpflanze erzeugt, sieht man sich für die meisten Modelle schon mit einer unhandlichen Menge von Daten konfrontiert. Um diese Menge zu reduzieren, müssen Modellrepräsentationen geschaffen werden, die eine Pflanze in unterschiedlichen Detaillierungsstufen darstellen. Bei der Anzeige auf dem Bildschirm wird dann je nach der sichtbaren Größe der Pflanze die entsprechende Repräsentation verwendet, was eine drastische Reduktion der zu bearbeitenden Daten ermöglicht.

Zuvor müssen jedoch effiziente Verfahren geschaffen werden, mit denen sich abschätzen lässt, was für einen potentiellen Betrachter überhaupt sichtbar ist. Geht der virtuelle Spaziergänger etwa durch einen synthetisch erzeugten Wald, so ist es meist nicht nötig, auch die Bäume in der hundertsten Reihe zu zeigen, da sie mit großer Sicherheit von den vorderen verdeckt werden. Entsprechende Verfahren werden mit Erfolg in anderen Bereichen eingesetzt und müssen für synthetische Landschaften angepasst werden.

Im nächsten Schritt sind die Pflanzengesellschaften anzusehen. In der Botanik existieren beschreibende, aber selten algorithmische Modelle zur Definition von Pflanzenpopulationen und Pflanzengesellschaften. Auf der anderen Seite beschäftigen sich Mathematiker mit der Beschreibung und Simulation interagierender Mengen diskreter Objekte und wenden die Ergebnisse auch auf Pflanzenpopulationen an.

In der Computergraphik ist man an den beschreibenden Modellen aber nur dann interessiert, wenn sie sich auch in effiziente Algorithmen umsetzen lassen. Dies gilt auch für die Verfahren der diskreten Mathematik, die sich oft nicht so leicht integrieren lassen. Die hier verwendeten Simulationsprozesse sind beispielsweise oft zu aufwendig für eine Anwendung. Es müssen daher effiziente Verfahren zur Spezifikation von Pflanzenpopulationen gefunden werden. Hierbei sind auch unterschiedliche Standortbedingungen wie etwa Wasser- und Lichtangebot zu berücksichtigen.

Eine wesentliche Frage, die die Verfahren der Computergraphik von denen der Botanik unterscheidet, ist die Komplexität der notwendigen Systeme. Während in der Botanik eher kleinere Bereiche untersucht werden oder aber größere mittels Abstraktion vereinfacht werden können, müssen für die Bilderzeugung auch große Areale von einigen Quadratkilometern in voller visueller Detaillierung erzeugt werden. Allein das Speichern der Pflanzenstandorte kann hier zum Problem werden, da Milliarden von Positionen zu merken sind. Das macht für die Graphiker Verfahren interessant, die die Positionen erst bei Bedarf erzeugen und, nachdem eine Pflanze nicht mehr sichtbar ist, wieder vergessen. Diese so genannte „on the fly“-Berechnung wirft eine Reihe interessanter Fragestellungen auf.

Die Frage nach effizienten geometrischen Repräsentationen stellt sich ferner bei geometrischen Modellen von Pflanzenpopulationen und -gesellschaften. Es ist herauszufinden, was visuell wichtig an einer Pflanzengesellschaft ist und wie die wichtigen Elemente in der geringst möglichen Auflösung dargestellt werden können. Obwohl nicht alle diese Fragen schon beantwortet werden

können, werden im Folgenden zumindest Ansätze vorgestellt, die das Gesamtbild erahnen lassen.

Im Übrigen, und das sei auch schon an dieser Stelle erwähnt, wird die zu erwartende rasante Entwicklung der Computergraphik-Hardware in den nächsten Jahren nicht dazu führen, dass die Verfahren zur Minimierung der Geometrie obsolet werden. Vielmehr haben die vergangenen Jahrzehnte gezeigt, dass die gewünschten Modellkomplexitäten stets stärker gewachsen sind als die entsprechenden Rechnerleistungen. Vielleicht wird man in einigen Jahren an einen Punkt kommen, an dem alle wesentlichen Anforderungen an die Graphikleistung der Rechner gestillt sind. Zumindest heute ist dies aber noch nicht abzusehen.

---

## Abschnitt 1.2

### BILDERZEUGUNG VON VIRTUELLEN LANDSCHAFTEN

## 1.2 Bilderzeugung von virtuellen Landschaften

Je nach Anwendungsfeld existieren bei der Landschaftsvisualisierung unterschiedliche Ziele, die mit einem Bild verfolgt werden: In der Botanik wird oft nur die grobe Darstellung der Form benötigt. Die Architektur, und in manchen Fällen auch die Landschaftsplanung oder auch Computerspiele und Simulationen, fordern Bilder, die zusätzlich zur Form auch die Lichtverhältnisse und detailliertere Strukturen wiedergeben. Im Film und in der Werbung wiederum möchte man für die Mischung echter Charaktere mit synthetischen Szenen und auch für spezielle Landschaftsaufnahmen gerne fotorealistische Darstellungen. Eine weitere, abstraktere Darstellungsart ergibt sich hier für Zeichentrickfilme, die Bilder im Comicstil benötigen.

Es stellt sich also die Frage, welche Effekte für die Generierung synthetischer Landschaftsbilder notwendig sind. Ist beispielsweise bei der Berechnung fotorealistischer Bilder die aufwendige Simulation der globalen Beleuchtung notwendig? Welchen Einfluss haben die verschiedenen Beleuchtungsfaktoren für die situationsbezogene „Echtheit“ der Darstellung?

Sollen approximative Geometrieprepräsentationen zur Reduktion der Daten verwendet werden, stellt sich auch hier die Frage, was Bewuchs eigentlich charakteristisch aussehen lässt, wo vorgefertigte Bilder als Ersatz verwendet werden können und wie die pflanzliche „Füllmasse“ dargestellt werden kann. Wie werden Level-of-Detail-Modellbeschreibungen – also solche, die eine Pflanze je nach erforderlicher Größe auf dem Bildschirm unterschiedlich detailliert erzeugen – in den Prozess der Bilderzeugung, das Rendering, integriert, mit welchen Methoden kann die Geometriemenge, also die Menge der insgesamt zu erzeugenden und zu verarbeitenden Daten, weiter verringert werden? Wie geschieht der Wechsel zwischen verschiedenen Modellrepräsentationen und -auflösungsstufen, ohne dass der Betrachter etwas davon merkt.

Schließlich ist es sinnvoll, zu klären, was eine „schöne“ Landschaft eigentlich ausmacht. Dies ist ein intensiv untersuchtes Gebiet in der Ökologie und auch der Ästhetik. Was kann man daraus entnehmen, um etwa visuell schöne Landschaften zu erzeugen bzw. wie können einmal hergestellte Landschaften

geschönt werden? Gibt es Grenzen für die Anzahl/Positionierung verschiedener Pflanzen?

Es wurde bereits erwähnt, dass auch die nicht-fotorealistische Darstellung der synthetischen Landschaften ihre Anwendungen hat. So werden in der Landschaftsplanung und der Architektur Planungsergebnisse traditionell als Skizzen präsentiert. Hierfür gibt es mehrere Gründe: Zum einen visualisiert eine Skizze ein Modell eines Objekts, eine fotorealistische Darstellung hingegen eher eine konkrete Ausprägung. Zum anderen sind Betrachter viel eher dazu zu bringen, in einer Skizze etwas zu verändern als in einer realistischen Darstellung. Die Skizze legt den Planer auch lange nicht so stark auf ein Aussehen fest wie ein realistisch wirkendes Computerbild. Größen- und Lichtverhältnisse können hingegen gut dargestellt werden, außerdem ist es möglich, wichtige Bereiche anders zu zeichnen als unwichtige und damit den Fokus des Betrachters zu lenken.

Die abstrakte Visualisierung von Pflanzen verlangt aber neue Methoden für die Erzeugung. So benötigt man speziell präparierte Modelle, in denen die Geometriedaten im Hinblick auf die Darstellung reduziert und verändert werden. Hier stellt sich eine Reihe von Fragen, die schon seit jeher die bildende Kunst beschäftigen. Etwa, wie Form und wie Licht und Schatten dargestellt werden. In Kapitel 11 wird gezeigt, dass es eine Reihe unterschiedlicher Verfahren in den traditionellen Künsten gibt. Zum Teil können diese in Ansätze zur computergraphischen Modellierung umgewandelt werden. Hierzu sind allerdings gänzlich neue Herangehensweisen erforderlich, auch die Form der benötigten Geometriemodelle ist hierfür zu ändern.

Abstrakte Darstellungen erweitern aber die Ausdrucksmöglichkeiten der Computergraphik enorm. In Zukunft sollen es die Bilderzeugungsverfahren dem Anwender erlauben, aus einer reichen Auswahl an Darstellungsmethoden gezielt diejenige zu verwenden, die einer gegebenen Aufgabenstellung am angemessensten ist. Die fotorealistische Darstellung ist hier nur eine Möglichkeit von vielen.

### 1.3 Anwendungen virtueller Landschaften

Einige Anwendungsfelder synthetischer Landschaften wurden bereits erwähnt. Insbesondere in der Ökologie können die Pflanzenmodelle auch als Medium dienen: Sie transportieren Informationen über tiefer liegende Prozesse und visualisieren sie dem Betrachter, der auf diese Weise – gerade wenn er kein Experte ist – einfacher in die Regelmechanismen der Systeme Einblick gewinnen kann. Der Effekt wird unterstrichen, wenn sich die Darstellung an der Art der Argumentation und dem Umfeld der Präsentation orientiert, was insbesondere durch abstrakte Darstellungen möglich wird.

Dieser Transportaspekt spielt bei Visualisierungsanwendungen eine große Rolle. In Biologie und Botanik können mit synthetischen Landschaften sichtbare, insbesondere aber auch nicht sichtbare Parameter von Ökosystemen dar-

gestellt werden. Bodenstrukturen, Verschmutzungen, Problemzonen sowie Lebensräume von Arten oder auch Schallbelastungen sind solche Parameter, die mittels Visualisierungsverfahren in die synthetischen Landschaften eingebracht werden können. So ist es durchaus möglich, dass Landschaftsplaner und Architekten von synthetischen Pflanzenbildern profitieren, da über eine geeignete Visualisierung abstrakte Planungsergebnisse mit ihren Konsequenzen den entscheidenden Personen beispielsweise im Rahmen eines Wettbewerbs verständlich gemacht werden können.

Ferner ist man jetzt in der Lage, auch nicht vorhandene, also insbesondere ausgestorbene oder noch zu züchtende Pflanzen darzustellen. In der Botanik könnten auf diese Weise auch genetische Veränderungen bei Nutzpflanzen vorab visualisiert werden und es wäre möglich, botanische Designparameter direkt an den Modellen zu diskutieren. Neben der Darstellung von Ist-Zuständen oder Planungsergebnissen kann man mittels der Modelle insbesondere auch zeitliche Veränderungen von Ökosystemen visualisieren. Bisher ist die Aufzeichnung von Wachstumsvorgängen einzelner Spezies in komplexen Pflanzengesellschaften nur durch Intervall-Fotografie möglich. Dies ist für längere Prozesse aufwendig und teuer, weshalb die Simulation der Vorgänge und ihre Visualisierung eine sinnvolle Alternative darstellt.

Ein weiteres Anwendungsfeld synthetischer Pflanzen ist die Bestimmung und Eichung von Modellen zur Beschreibung physiologischer Vorgänge in Pflanzen, wie etwa die Bestimmung der Lichtaufnahme oder des Energieaustauschs mit der Umwelt. Hierzu werden speziell angepasste Modelle in entsprechende Simulatoren importiert, welche daraus die Werte über thermodynamische Verfahren berechnen.

Auch in einer weiteren Simulationsanwendung sind realistische Pflanzenmodelle sinnvoll: Fahr- und Flugsimulatoren benötigen Bewuchs zur räumlichen Orientierung der Benutzer. Insbesondere in Bodennähe ist die realistische Abbildung des Bewuchses unerlässlich für den Raumeindruck.

Das größte Anwendungsgebiet synthetischer Pflanzen liegt derzeit im Filmbereich. Virtuelle Pflanzen werden in speziellen Außenszenen verwendet oder für Spezialeffekte mit Einzelpflanzen. Animationen innerhalb geographischer Informationssysteme, die Visualisierung ganzer Landschaften sowie die Herstellung interaktiv begehrter Landschaften für VR-Systeme und Computerspiele runden die möglichen und zum großen Teil auch schon bearbeiteten Anwendungsfelder für synthetische Pflanzengeometrien ab.

Entsprechend den bereits genannten Aspekten besteht das vorliegende Buch aus mehreren Teilen. Im ersten Teil, der aus den Kapiteln zwei bis sechs besteht, wird auf die Modellierung von Einzelpflanzen eingegangen. Ausgehend von botanischen und mathematischen Beschreibungsverfahren werden in Kapitel vier so genannte prozedurale Methoden zur Erzeugung von Pflanzengeometrien beschrieben, in denen die Modelle durch Spezialalgorithmen synthetisiert werden. Dies wird im fünften Kapitel durch die so genannte regelbasierte Modellierung ergänzt, bei der durch Anwendung von Regeln aus einem einfachen

Startzustand ein komplexes Objekt entsteht. Lindenmayer-Systeme spielen hier eine wichtige Rolle.

In Kapitel sechs wird die regelbasierte Objekterzeugung vorgestellt, eine Methode, die regelbasierte und prozedurale Modellierverfahren kombiniert und damit eine Reihe von Problemen bei der Herstellung von Pflanzengeometrien beseitigt. Das Verfahren wird mit den bereits existierenden Methoden verglichen.

Der zweite Teil beschäftigt sich mit der Modellierung von Terrain und den darauf angesiedelten Pflanzengesellschaften. Auch hier wird, ausgehend von Arbeiten aus der Botanik und Geologie, eine Systembeschreibung versucht, die es möglich macht, die geforderten Komplexitäten für die Bilderzeugung zu erbringen und effizient zu handhaben. Jeder, der schon eine Stunde auf die Herstellung eines Computerbildes gewartet hat, weiß, wie schwer es ist, mit solchen Antwortzeiten etwas zu modellieren.

Daher werden im dritten Teil Fragen zur effizienten Bilderzeugung synthetischer Landschaften behandelt. Ausgehend von den grundlegenden Algorithmen der Bilderzeugung werden verschiedene Ansätze zur Herstellung realistisch wirkender Landschaftsbilder beschrieben, wobei insbesondere auf neuere, effiziente Verfahren eingegangen wird. Hier spielen auch die Level-of-Detail-Geometrirepräsentationen eine Rolle, insbesondere dort, wo die schnelle Bilderzeugung im Vordergrund steht. Die Algorithmen machen es möglich, kleinere Landschaften schon heute interaktiv darzustellen und etwa virtuell darin umher zu wandern.

Ein Kapitel zur nicht-fotorealistischen Bilderzeugung rundet die Zusammenstellung ab, hier wird auch die Herstellung weiterer Modelle angesprochen und der Bezug zur Kunst hergestellt.