

Leistungsfähige Verfahren zur Simulation und Darstellung von Pflanzenkonkurrenz und Umweltfaktoren für die Computergrafik

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)
an der Universität Konstanz

Mathematisch-Naturwissenschaftliche Sektion
Fachbereich Informatik und Informationswissenschaft

vorgelegt von
Dipl.-Inf. Monssef Alsweis

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen eines Stipendiums der Arabischen Republik Syrien für Computergrafik und Medieninformatik. Die Arbeit wurde am Fachbereich Informatik und Informationswissenschaft an der Universität Konstanz in Deutschland ausgeführt.

Ich danke Professor Dr. Oliver Deussen, meinem Doktorvater, für die Bereitstellung dieses interessanten Themas und den großen Freiraum bei dessen Bearbeitung.

Frau Anna Dowden-Williams danke ich für Ihre unermüdliche Unterstützung im sprachlichen Bereich.

Meine Familie und meine Frau Abeer Alnaser möchte ich besonders für ihre Unterstützung danken.

Weiterhin möchte ich mich bei den Mitgliedern der Arbeitsgruppe Computergrafik und Medieninformatik für die stets kollegiale Atmosphäre bedanken.

Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, einen hohen Grad von Realismus bei der Visualisierung von Pflanzenmodellen und virtuellen Landschaften zu erreichen, da die Simulation und Visualisierung von natürlichen Phänomenen zu einem immer wichtigeren Bestandteil in vielen wissenschaftlichen und industriellen Anwendungen wird, wie etwa der Landschaftsplanung, Ökologie, Architektur oder im Film. In meiner Arbeit beschreibe ich unterschiedliche Methoden zur Simulation von komplexen Pflanzeninteraktionen, indem ich die Entwicklung von Pflanzenpopulationen im Kontext ihrer Umgebung betrachte.

In einer ersten Methode wird die Pflanzenkonkurrenz auf symmetrische und asymmetrische Weise dargestellt. Die symmetrische Konkurrenz ist eine doppelseitige Interaktion zwischen Pflanzen, die asymmetrische Konkurrenz hingegen ist eine einseitige Interaktion. Ich erweitere dies, indem ich die Konkurrenz in eine Untergrund- und Obergrundkonkurrenz unterteile. Die Obergrundkonkurrenz, die hauptsächlich durch den Kampf der Pflanzen um Licht erzeugt wird, ist hierbei nicht immer asymmetrisch, sondern je nach der optischen Interaktion symmetrisch am Rand des Einflussbereichs und asymmetrisch in Inneren. Durch die Berücksichtigung dieser Unterteilung erweitern sich auch die Einflusszustände zweier Pflanzen aufeinander von bisher vier auf neun Zustände.

Weiterhin wird die Untergrund- und Obergrundkonkurrenz erweitert, um spezielle Konkurrenzsituationen zu simulieren. Hierzu zählt die Konkurrenz zwischen verschiedenen Pflanzenwurzelsystemen, zwischen kranken und gesunden Pflanzen oder von Pflanzen, die in extrem trockenen Bodenverhältnissen und Klimata wachsen, wie beispielsweise in der Wüste.

Die Modellierung von großen und komplexen Ökosystemen lässt zusätzliche Probleme entstehen, da die Simulationsverfahren typischerweise viel Rechenzeit benötigen. Um dieses Problem zu lösen, verwende ich nicht-periodische Kachelungen, die es erlauben, die Menge der zu berechnenden Pflanzen zu minimieren. Ich habe diese Methode erweitert, um obige Simulationsverfahren effizient auf gekachelten Ökosystemen ablaufen zu lassen. Zusätzlich habe ich Methoden entwickelt, um Fehler an den Kachelkanten und zwischen unterschiedlichen Verteilungsdichten zu beseitigen.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Zielsetzung der Arbeit	1
1.2 Beiträge dieser Forschungsarbeit	2
1.3 Aufbau dieser Forschungsarbeit	3
2 Ökologische Grundlagen	5
2.1 Wachstum der einzelnen Pflanze	5
2.2 Pflanzensterblichkeit	7
2.3 Pflanzenvermehrung	7
2.4 Populationswachstum	8
2.5 Ausdünnung und Selbst-Ausdünnung	13
3 Relevante Vorarbeiten	15
3.1 Prozedurale Verfahren	15
3.2 Regelbasierte Verfahren	16
3.3 Regelbasierte Objekterzeugung	20
3.4 Die Wechselwirkungen	22
3.5 Modellierung von Ökosystemen	25
3.6 Kachelbasierte Beschreibungsverfahren	29
4 Konkurrenzarten	33
4.1 Motivation	34
4.2 Die Pflanzenkonkurrenz	35

4.3	Das Pflanzenwachstum	40
4.4	Reproduktion von Pflanzen	42
4.5	Sterblichkeit von Pflanzen	42
4.6	Die Erweiterung der Konkurrenz	42
4.7	Simulation des Verfahrens	44
4.8	Zusammenfassung und Ergebnisse	47
5	Unterschiedliche Konkurrenzarten	51
5.1	Motivation	51
5.2	Untergrund- und Obergrundkonkurrenz	53
5.3	Konkurrenzarten	57
5.4	Wachstumsmodelle	58
5.5	Implementierung	59
5.6	Ergebnisse	60
6	Kachelbasierte Pflanzenverteilung	63
6.1	Einleitung	63
6.2	Kachelbasierte Verteilung	64
6.3	FON Verteilung	66
6.4	FON Verfeinerung	67
6.5	Weiche Intensitätsübergänge	68
6.6	Anwendung der Methode	69
6.7	Ergebnisse	70
7	Erweiterung des Konkurrenzverhaltens	75
7.1	Einführung	75
7.2	Die Konkurrenz um das Licht	76
7.3	Die Konkurrenz durch Wurzelsysteme	78
7.4	Ammenpflanzen	79
7.5	Konkurrenz zwischen gesunden und kranken Pflanzen	80

7.6 Beispiele	81
7.7 Ergebnisse	82
8 Äußere Einflusseffekte	89
8.1 Relevante Arbeiten	89
8.2 Biologische Hintergründe	90
8.3 Simulation der Effekte	91
8.4 Ergebnisse	96
9 Zusammenfassung	99
Anhänge	101
A Überlappungsbereich zweier Pflanzen	101
B Sobel Randdetektor	103
C Perlinsche Rauschfunktion	105

Kapitel 1

Einleitung

Einer der wichtigen Bereiche in der Computergraphik ist die Darstellung natürlicher Phänomene. Diese Arbeit befasst sich mit Problemen der Modellierung und Visualisierung von Pflanzenpopulationswachstum. Die erarbeiteten Verfahren dienen dazu, wichtige Aspekte des Entwicklungsprozesses von Pflanzen und Ökosystemen in einem Computermodell darzustellen, welches besonders für die Computergraphik geeignet ist.

1.1 Zielsetzung der Arbeit

Der Hauptfaktor, der die Entwicklung von Pflanzen und Pflanzenökosystemen beeinflusst, ist ihre Konkurrenz um Nährstoffe. In den bisherigen Arbeiten zu diesem Thema wurde die Interaktion zwischen Pflanzen und ihrer Umgebung simuliert und visualisiert ohne Berücksichtigung der verschiedenen ökologischen Phänomene und der Unterschiede in den verschiedenen Formen der Konkurrenz. Hingegen unterscheidet die von mir für die Computergrafik adaptierte Pflanzenkonkurrenzmethode zwischen symmetrischer und asymmetrischer Konkurrenz. Sie ermöglicht auf diese Weise eine präzise Darstellung von Pflanzeninteraktionen und einer großen Auswahl natürlicher Phänomene. Die Verfahren beinhalten:

- Die Pflanzenverteilung auf dem Boden unter Berücksichtigung der Nährstoffintensität.
- Die Berechnung des Pflanzenwachstums mit verschiedenen Interaktionsarten.
- Die Simulation der Pflanzenvermehrung und Pflanzensterblichkeit.

Die Modellierung und Visualisierung von großen Pflanzengruppen und Darstellung der Entwicklung dieser Gruppen mit Hilfe der Konkurrenzsimulation in Echtzeit ist ein schwieriges Problem, da viele Daten gespeichert werden müssen. Aus diesem Grund wurden Verfahren entwickelt, die den Speicheraufwand für die Daten und den Modellieraufwand für eine große Pflanzenpopulation reduzieren. Dafür wird die Fläche, auf der die Pflanzen verteilt werden, in Vierecke (Kacheln) zerlegt. Auf jeder Kachel wird ein kleiner Teil der Pflanzen simuliert und verteilt. Um eine große Pflanzenpopulation auf einer Fläche darzustellen, werden die Kacheln auf der Fläche wiederholt. Hierbei werden nicht-periodische Parkettierungen verwendet, um sichtbare Wiederholungsartefakte zu vermeiden. Obwohl diese Methode große Pflanzenpopulationen mit erheblicher Reduktion des Modellierungs- und Speicherungsaufwandes erzeugt, beinhaltet sie einige Nachteile. Einer dieser Nachteile ist das Ignorieren des Terrains und der Nährstoffintensität im Boden. Die kachelbasierte Pflanzenverteilung ist eine Erweiterung der sogenannten Wangschen Kachelmethode. Die Kacheln erhalten hier zusätzliche Informationen über Positionen, Wachstumsfaktoren und Umgebung und werden über angepasste Simulationsverfahren mit Verteilungen verschiedener Intensitäten gefüllt. Zusätzlich werden verschiedene neue Methoden angewendet, um die Fehler an Kachelkanten und zwischen unterschiedlichen Nährstoffgebieten zu beseitigen, z.B. verfeinerte Simulationsmodelle und Supersampling.

1.2 Beiträge dieser Forschungsarbeit

Die Beiträge dieser Forschungsarbeit in der Computergraphik und der ökologischen Modellierung der Pflanzenpopulation und der natürlichen Phänomene sind wie folgt: Erstens wurden verschiedene neue ökologische Verfahren mit aktuellen Anwendungsbereichen der Computergrafik simuliert und visualisiert [59, 61].

Die Nährstoff- und Lichtkonkurrenz zwischen den Pflanzen und zwischen den Pflanzen und ihrer Umgebung in der Computergrafik wurde adaptiert. In [59] wurde die Pflanzenkonkurrenz auf symmetrische und asymmetrische Konkurrenz erweitert. Die Konkurrenten erhalten die gleiche Nährstoffmenge im Konkurrenzbereich mit der symmetrischen Methode, während mit der Anwendung der asymmetrischen Methode nur ein Konkurrent alle Nährstoffe im Konkurrenzbereich erhält. In [61] wurde eine Mischung der symmetrischen und asymmetrischen Lichtkonkurrenz anstatt der rein asymmetrischen Konkurrenz betrachtet. Zusätzlich wurden verschiedene Konkurrenzsituationen in der Simulation berücksichtigt.

Zweitens wurde das entwickelte Simulationsverfahren erweitert, um mannigfaltige und spezielle Konkurrenzstände mit effizienten Simulationsmethoden und oftmals interaktiven Verfahren zu visualisieren.

Es wurden verschiedene Methoden angewendet und erweitert, um die räumliche Pflanzenverteilung in unterschiedlichen Intensitäten zu modellieren [29]. Zwei Verfeinerungsmethoden dienen dazu, um das Rauschen an der Kachelkanten und der Fehler zwischen Nährstoffbereichen zu beseitigen. Die erste Methode ist die „Fon Verfeinerung“, bei der die Kacheln so angepasst werden, dass auch bei unterschiedlichen Verteilungsdichten an den Kachelgrenzen keine Artefakte erscheinen, das zweite Verfahren zerlegt Kacheln, um Dichteschwankungen besser darzustellen.

Wesentliche Ergebnisse der vorliegenden Arbeit wurden in folgenden Tagungs- bänden und Zeitschriften publiziert:

- [60] M. Alsweis and O. Deussen: „Modeling and Visualization of symmetric and asymmetric plant competition“, *Eurographics Workshop on Natural Phenomena, Dublin, 2005*,
- [61] M. Alsweis and O. Deussen: „Efficient simulation of vegetation using light and nutrition competition“, *Simulation und Visualisierung 2006, Magdeburg*,
- [62] M. Alsweis and O. Deussen: „Wang-Tiles for the Simulation and Visualization of Plant Competition“, *LNCS, Advances in Computer Graphics, 2006*,
- [63] M. Alsweis and O. Deussen: „Extended Competition Rules for Interacting Plants“, *International Conferences in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision, 2007*.

1.3 Aufbau dieser Forschungsarbeit

Dieser Abschnitt skizziert den Aufbau der Arbeit. Ausgehend von den ökologischen und mathematischen Grundlagen in Kapitel 2, die zum Verstehen der Simulationsvorgänge nötig sind, werden die wichtigsten existierenden Verfahren aus dem Bereich der Simulation und Modellierung von Pflanzen in Kapitel 3 erörtert. Hier beschreibe ich auch bestehende Methoden zur Simulation von Ökosystemen.

In Kapitel 4 wird eine neue Methode für die Darstellung der symmetrischen und asymmetrischen Pflanzenkonkurrenz vorgestellt. In Anschluss daran wird die Konkurrenz zwischen normalen Pflanzen und sogenannten Seed-Banking Pflanzen berücksichtigt. Der von Seed-Banking Pflanzen produzierte Samen kann im

Gegensatz zu anderen Pflanzen im Boden ruhen und damit seine Chancen für ein erfolgreiches Wachstum vergrößern.

In Kapitel 5 wird die Lichtkonkurrenz für symmetrische und asymmetrische Fälle simuliert. Zusätzlich werden verschiedene Zustände der Pflanzenkonkurrenz mit ihren Nachbarpflanzen visualisiert. Dies hilft, Wachstumssimulationen genauer durchzuführen, als das mit herkömmlichen Verfahren der Fall ist.

In Kapitel 6 erweitere ich die sog. Wangsche Kachelmethode durch neue Techniken, die zur Beseitigung der Fehler zwischen den benachbarten Kacheln und zwischen verschiedenen Nährstoffgebieten dienen, um die Rechenzeit der Simulationsverfahren zu minimieren und große und komplexe Ökosystem modellieren zu können.

In Kapitel 7 wird ein neues Verfahren zur Darstellung der Konkurrenz zwischen unterschiedlichen Pflanzenwurzelsystemen vorgestellt. Zusätzlich wird die Lichtkonkurrenz bereichsweise in symmetrische und asymmetrische Konkurrenz unterteilt. Im Anschluss daran stelle ich die Konkurrenzsimulation für Ammenpflanzen vor. Schließlich wird die Konkurrenz zwischen gesunden Pflanzen und anderen simuliert, die zu einem beliebigen Zeitpunkt während der Simulation erkranken.

Kapitel 8 rundet diese Arbeiten durch die Modellierung weiterer Effekte wie etwa der äußeren Einflüsse auf das Aussehen von Pflanzenblättern ab. Schließlich werden in Kapitel 9 die Verfahren noch einmal kurz zusammengefasst.

Kapitel 2

Ökologische Grundlagen des Pflanzenwachstums

In diesen Kapitel werden die grundlegenden ökologischen und mathematischen Theorien und Arbeiten zur Wachstumssimulation von Pflanzen und Ökosystemen beschrieben.

Zu Beginn beschreibe ich kurz die Wachstumsfunktion einzelner Pflanzen. Des Weiteren wird die Dynamik der Pflanzensterblichkeit und Pflanzenvermehrung erläutert. Im Anschluss daran wird ein Verfahren zur Entwicklung von Pflanzenspopulationen präsentiert, welche die Dynamik des Populationswachstums unter einer Reihe von Bedingungen simuliert.

Schließlich werden Methoden für die Ausdünnung und Selbst-Ausdünnung beschrieben. Diese sind wesentliche Bestandteile dieser Arbeit und werden in den folgenden Kapiteln erweitert.

2.1 Wachstum der einzelnen Pflanze

Für das Modellieren des Pflanzenwachstums, können unterschiedliche Verfahren angewendet werden:

i) Mechanistische Pflanzenmodelle: Hier werden biotische und abiotische Effekte des Klimas, sowie der Einfluss benachbarter Pflanzen auf das Pflanzenwachstum modelliert. In einem mechanistischen Pflanzenmodell wird die Wachstumsrate unterschiedlicher Pflanzenarten als Funktion der vorhandenen Nährstoffe [27, 102, 25] modelliert. Solche mechanistischen Pflanzenmodelle enthalten Informationen darüber, wie die Pflanzen auf unterschiedliche Klimaeffekte reagieren.

ii) Empirische Pflanzenmodelle: Empirische Modelle sind mathematisch einfache Modelle mit Parametern.

Beide Modellierungsverfahren können verbunden werden, wenn eine ausführliche Analyse der Parameter und der Dynamik in einem mechanistischen Pflanzenmodell vorgenommen wird, und das mechanistische Pflanzenmodell zu einem mathematisch einfachen Modell unter Berücksichtigung wichtiger Parameter vereinfacht wird [97].

In der Vergangenheit wurden verschiedene Wachstumsmodelle entwickelt, um das Wachstum von einzelnen Pflanzen zu beschreiben [32], unter anderem sigmoidale Modelle und gesättigte Modelle (Richards Wachstumsmodell).

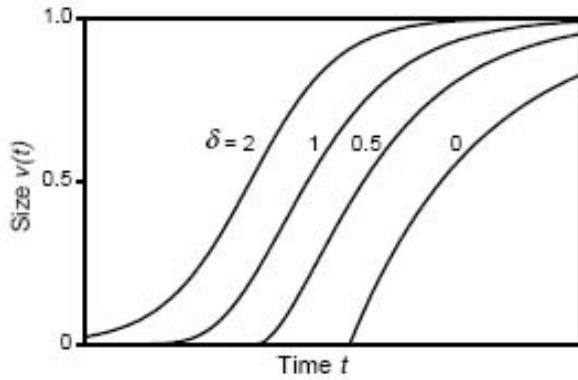


Abbildung 2.1: Kurven des Richards Wachstumsmodells für verschiedene Werte Von δ . Abbildung nach Richards (1959).

Im Richards Wachstumsmodell [31, 46, 54] wird das Wachstum einer Pflanze zur Zeit t als proportional zur Pflanzengröße angenommen:

$$\frac{dv(t)}{dt} = \frac{k}{1-\delta} v(t) \left(\left(\frac{v(t)}{w} \right)^{\delta-1} - 1 \right) \quad \delta \neq 1 \quad (2.1)$$

Dabei ist $v(t)$ die Pflanzengröße in der Zeit t , k ein Wachstumsparameter und w die abschließende Pflanzengröße. Die anfängliche Wachstumsrate ist $k/(\delta-1)$ (siehe Abbildung 2.1).

2.2 Pflanzensterblichkeit

Die Pflanzensterblichkeit in einer Pflanzenpopulation wird sowohl von dichteunabhängigen als auch von dichteabhängigen Effekten bestimmt. In der Praxis ist es schwierig, diese zwei Arten von Sterblichkeit zu trennen.

Harper [48] gibt das folgende Beispiel: Die Sterblichkeitsgefahr eines Sämlings wegen des Stoßes von Regentropfen oder von Hagelkörnern ist dichteunabhängig. Ob die Samen sterben, nachdem sie getroffen wurden, ist auch ein Faktor der Größe und der Stärke der Samen und ist damit dichteabhängig.

Im Allgemeinen ist der relative Effekt des Dichteabhängigkeitsfaktors abhängig von der Pflanzengröße in einer Pflanzenpopulation, weil der Effekt der negativen Interaktionen zwischen den Nachbarn sich mit zunehmender Stärke und Größe der Pflanzen erhöht. Die dichteabhängige Sterblichkeit in einer Monokultur kann geschrieben werden, indem man annimmt, dass die Dichte der überlebenden Pflanzen x eine Funktion der Samendichte x_0 ist [8]:

$$x = \frac{x_0}{1 + m_d x_0} \quad (2.2)$$

Dabei ist m_d^{-1} die maximale Dichte für die aktuelle durchschnittliche Größe der Pflanze.

Die dichteunabhängige Sterblichkeit kann hauptsächlich bei Samen- und Sämlingsstationen auftreten z.B. bei Tod während der Samenruhe, einigen Formen des Samenraubs, ungünstigen Bodennährstoffen und lokaler niedriger Wasser Verfügbarkeit [55]. Wenn die dichteunabhängige Sterblichkeit überwiegt, dann kann die Dichte der überlebenden Pflanzen durch folgende Gleichung definiert werden:

$$x = \frac{m_i x_0}{1 + m_d m_i x_0} \quad (2.3)$$

Dabei ist m_i eine Konstante.

2.3 Pflanzenvermehrung

Die Anzahl der Samen (die Fruchtbarkeit), die von einer Pflanze produziert wird, hängt von der Pflanzenart ab, und wird durch die Lebensentwicklung und adaptive Strategie der Pflanzenart bestimmt [48, 67]. Einjährige und einige mehrjährige Pflanzenarten reproduzieren sich nur einmal, bevor sie sterben.

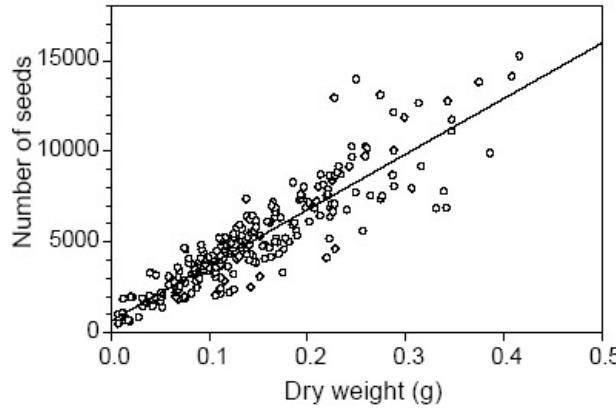


Abbildung 2.2: Die Darstellung des linearen Verhältnisses zwischen der Zeit und der Anzahl der Samen, Quelle: [19].

Die meisten Pflanzen wandeln alle vorhandenen Pflanzennährstoffe zur Produktion der Samen um. Die Fruchtbarkeit b ist häufig eine lineare Funktion der Pflanzenbiomasse w zur Reproduktionszeit (siehe Abbildung 2.2) [19].

$$b(w) = b_0 + b_1 w \quad (2.4)$$

In vielen Konkurrenzexperimenten wird die Fruchtbarkeit durch eine Funktion der Pflanzendichte im reproduktiven Alter berechnet. Wegen der Beziehung zwischen Pflanzengröße und Fruchtbarkeit als lineare Funktion, kann die durchschnittliche Fruchtbarkeit wie folgt modelliert werden:

$$b(x) = (\alpha + \beta x^\phi)^{-1/\theta} \quad (2.5)$$

Dabei ist x die Pflanzendichte zum reproduktiven Alter. β und α sind die Stärke der Konkurrenz. ϕ ist eine Konstante [47].

2.4 Populationswachstum

Wenn eine Pflanzenpopulation aus einer großen Anzahl von Einzelpflanzen besteht, die über einem Bereich verteilt ist, ist es wichtig die Dynamik des Populationswachstums zu verstehen, um sie qualifiziert in Computergraphik-Bilder umzusetzen. Nachstehend werden einige Methoden zur Beschreibung der Verteilung von Pflanzenpopulation sowie des Populationswachstums zusammenfassend beschrieben.

2.4.1 Die Verteilung der Pflanzenpopulationen

In der Vergangenheit wurden verschiedene Verfahren entwickelt, um Pflanzenpopulationen auf einem Terrain zu verteilen. Diese Verfahren können wie folgt unterteilt werden:

- Iterative Verteilung

Diese Form der Verteilung kann auf zwei Arten geschehen. Entweder werden Punkte nach und nach in eine Punktmenge eingefügt, bis vorgegebene Parameter wie etwa die Punktdichte erfüllt sind, oder aber eine Punktmenge wird so verändert, dass ihre statistischen Eigenschaften vorgegebenen Werten entspricht.

Eine Poisson-Verteilung [49], wie sie durch folgende Gleichung definiert wird, ist eine gute Approximation einer natürlichen Verteilung:

$$\mathbf{P}_i = \sqrt{\frac{q_i}{\pi\lambda}} \mathbf{e}_i \quad \lambda > 0, i = 1, 2, \dots \quad (2.6)$$

wobei \mathbf{P}_i die erzeugten Punkte sind, λ die vorgegebene Punktdichte, \mathbf{e}_i der gleichverteilte Einheitsvektor und die q_i durch folgende Gleichung bestimmt werden.

$$q_1 = -\ln v_1, q_{i+1} = q_i - \ln v_{i+1}. \quad (2.7)$$

Hier steht v_i für gleichverteilte Zahlen.

- Adaptive Verteilung

Oftmals verhindern Pflanzen, dass andern Pflanzen in ihrer Nähe wachsen. Dies wird mit einer Poisson-Disk-Verteilung wie folgt umgesetzt: Um eine Menge von den Punkten p_1, \dots, p_n , die durch eine Poisson-Verteilung charakterisiert ist, in eine solche Poisson-Disk Verteilung umzuwandeln, wird jedem Punkt p_i aus der Punktmenge sein jeweiliges Voronoi-Gebiet zugeordnet. Anschließend werden die Punkte in den Schwerpunkt ihrer Voronoi-Gebiete durch die Anwendung eines iterativen Optimierungsverfahrens (generalisierte Lloyd'sche Methode) verschoben. In Abbildung (2.3) ist diese Methode mit einer Punktmenge visualisiert.

- Interaktive Verteilung

Die interaktive Verteilung einer Pflanzenpopulation wird durch menschlichen Eingriff kontrolliert. Dieses Verfahren ist sinnvoll für die Visualisierung von Gärten oder Parks. Floyd-Steinberg hat z.B. in [92] einen

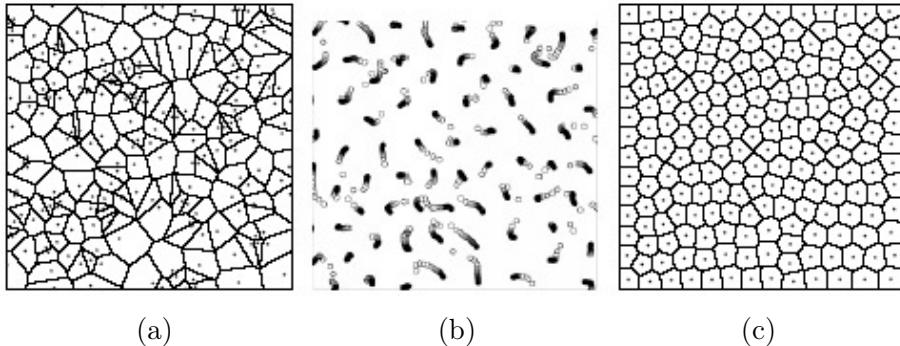


Abbildung 2.3: Darstellung der generalisierten Lloyd'schen Methode, a) Voronoi-Gebiete für eine initiale Punktmenge, b) iterative Bewegung der Punkte, c) die Ergebnisse nach 20 Iterationen, Quelle: [76].

interaktiven Algorithmus als Halbton-Verfahren vorgestellt. Hier malt der Benutzer ein Grauwertbild und der Rechner setzt dieses in Position um.

- Die Gebündelte(Cluster) Verteilung

Die zuletzt beschriebene Methode erzeugt tendenziell eine uniforme Pflanzenverteilung. In der Realität wachsen Pflanzen jedoch häufig gebündelt. Die Pflanzenansammlung (Pflanzenbündelung) wird als gruppierende oder Unter-Verteilung gekennzeichnet [68]. Die Ursachen für diese Pflanzenansammlung sind verschieden: z.B. (i) Pflanzen der gleichen Art tendieren dazu sich in ihrem Wachstumsbereich anzusammeln. (ii) Die Samen wachsen in der Nähe ihrer Pflanzeneltern.

Der Effekt der Ansammlung kann mit mehreren statistischen Maßen quantitativ festgelegt werden. In [13] wird der *Hopkins-Index* [12] beschrieben, und durch folgende Gleichung definiert:

$$H = \frac{\langle \min_i(\|x - p_i\|) \rangle_x}{\langle \min_i(\|p_j - p_i\|) \rangle_j}. \quad (2.8)$$

Wobei $\langle \min_i(\|x - p_i\|) \rangle_x$ der minimale Abstand eines zufällig gewählten Punkts zu der nächsten Pflanze innerhalb einer gegebenen Region ist und $\langle \min_i(\|p_j - p_i\|) \rangle_j$ der minimale Abstand zweier Pflanzen ist.

Ist $H = 1$, dann ist die Pflanzenverteilung zufällig. Wenn $H > 1$ ist, dann ist die Pflanzenverteilung gebündelt (clustered). Für $H < 1$ entsteht eine gleichmäßige Verteilung (siehe Abbildung 2.4).

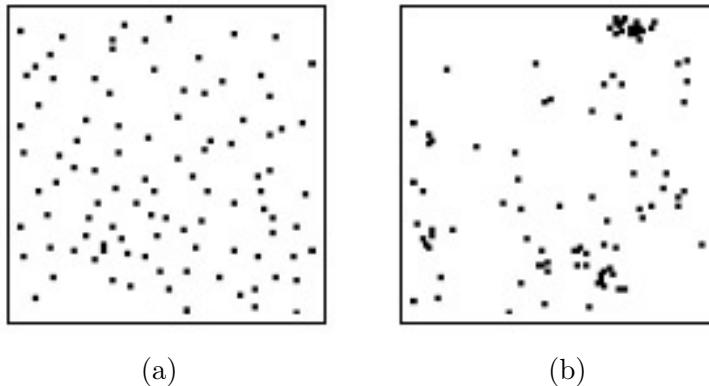


Abbildung 2.4: Hopkins-Index, a) Pflanzenverteilung mit $H = 0.4$, b) Pflanzenverteilung mit $H = 2.4$, Quelle: [13].

2.4.2 Zelluläre Automaten

Zelluläre Automaten modellieren eine Vielzahl von komplexen Systemen [105]. In der Landschaftsökologie werden diese Verfahren verwendet, um eine Landschaft als kartesisches Gitter darzustellen, wobei jede Zelle einem Bereich der Landoberfläche entspricht [23, 24, 66]. Die lokale Pflanzenpopulation in dem Bereich der Landoberfläche wird hier nicht mehr durch Einzelpflanzen sondern durch den Zustand dieser Zelle dargestellt. Der Zustand der Zelle (x, y) zum Zeitpunkt t wird durch die Anzahl der Pflanzen in der Zelle $N_{x,y}(t)$ dargestellt.

2.4.3 Lokale Populationsdynamik

Die lokale Populationsdynamik innerhalb jeder Zelle wird durch die diskrete logistische Gleichung beschrieben. Diese Gleichung ist für einen breiten Bereich der Populationsmodelle anwendbar, insbesondere für Arten, die sich jahreszeitlich bedingt reproduzieren:

$$N(t+1) = rN(t)\left(1 - \frac{N(t)}{K}\right). \quad (2.9)$$

Dabei ist $r \geq 0$ die Reproduktionsrate, und K die maximal mögliche lokale Populationsdichte (siehe Abbildung 2.5).

Um den Einfluss der Fruchtbarkeit und der Sterblichkeit getrennt zu zeigen, wird die Gleichung (2.9) wie folgt ausgedrückt:

$$N(t+1) = N(t) + (1 - r)N(t) + \left(-\frac{r}{K}\right)N(t)^2. \quad (2.10)$$

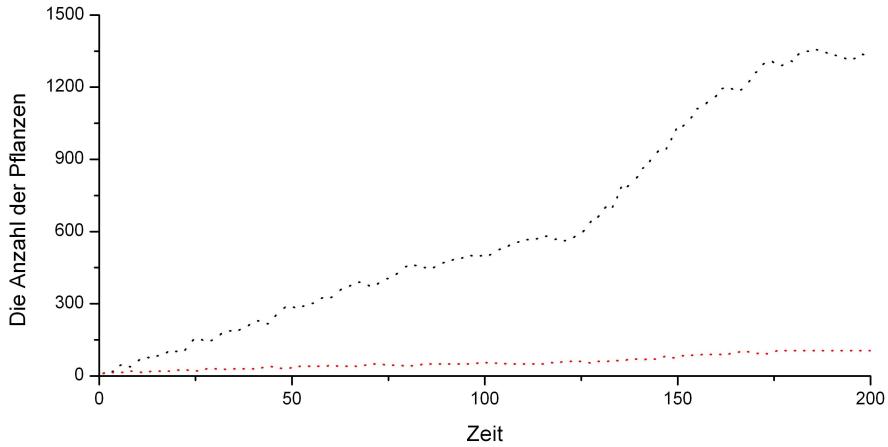


Abbildung 2.5: Lokale Populationsdynamik; die schwarze Linie stellt die Anzahl der jungen Pflanzen und die rote Linie stellt die Anzahl der alten Pflanzen dar.

Hier beeinflusst $(1 - r)$ die Fruchtbarkeit die Population, und die Sterblichkeit kann durch den Teil $-\frac{r}{K}$ unabhängig beeinflusst werden. Gleichung (2.10) kann auch wie folgt ausgedrückt werden [81]:

$$N(t+1) = N(t) + \alpha N(t) + \beta N(t)^2. \quad (2.11)$$

Hier stellt $\alpha = r - 1$ die Fruchtbarkeit, und $\beta = -\frac{r}{K} = -\frac{1+\alpha}{K}$ die Sterblichkeit dar. $N_{eq} = -\frac{\alpha}{\beta}$ wird Gleichgewichtspopulationsgröße genannt.

Wenn die anfängliche Population der Gleichgewichtspopulation entspricht $N(0) = N_{eq}$, dann bleibt die Anzahl der Pflanzen in der Population immer unverändert, $N(t) = N_{eq}$ für alle $t > 0$.

2.4.4 Migration

Um die Migration zwischen benachbarten Zellen auf dem Gitter zu erlauben, wird die Einschließung eines Migrationsteils zur Gleichung (2.11) benötigt. Dieser Teil wird durch den diskreten Ableitungsoperator ∂^2 zwischen einer Zelle (x, y) und ihren vier Nachbarn [95] hergestellt, der wie folgt definiert ist:

$$\partial^2 N_{x,y} = N_{x,y-1} + N_{x,y+1} + N_{x+1,y} + N_{x-1,y} - 4N_{x,y}. \quad (2.12)$$

Wenn dieser Operator zu Gleichung (2.11) hinzugefügt wird, erhalten wir das Verhalten der Zelle (x, y) in der Zeit t :

$$N_{x,y}(t+1) = N_{x,y}(t) + \alpha N_{x,y}(t) + \beta N_{x,y}(t)^2 + \gamma \partial^2 N_{x,y}(t). \quad (2.13)$$

Hier $\gamma < 1$ ist der Migrationsparameter für einen Zeitschritt.

Die Anzahl der Pflanzen kann in der realen Welt nie negativ werden, aber in Modellen wie in Gleichung (2.13) kann diese Bedingung für einige Parameterwerte übertreten werden [95]. Die übliche Lösung zu diesem Problem ist, den *Heaviside* Operator $H(z)$ [79, 95] zu verwenden, der wie folgt definiert ist: $H(z) = z$ für $z > 0$, und $H(z) = 0$ andernfalls. Dann wird das Gleichungssystem wie folgt modifiziert:

$$N_{x,y}(t+1) = H(N_{x,y}(t) + \alpha N_{x,y}(t) + \beta N_{x,y}(t)^2 + \gamma \partial^2 N_{x,y}(t)). \quad (2.14)$$

Für den Wert der Fruchtbarkeit ($\alpha < 0.3$), der hier verwendet wird, verhält sich die logistische Gleichung in einer nicht-chaotischen Weise. Sonst ist das Verhalten chaotisch [95].

2.5 Ausdünnung und Selbst-Ausdünnung

Sobald eine Pflanze mit dem Wachstum anfängt, beginnen auch die Wechselwirkungen zwischen der Pflanze und ihrer Umwelt.

Für das Wachstum benötigt die einzelne Pflanze Nährstoffe wie beispielsweise Licht und Wasser, und damit vermindern sich die Nährstoffe der Pflanzenpopulation allmählich. Aufgrund der knappen Nährstoffe sterben in den meisten Pflanzenpopulationen dann Pflanzen ab. Es findet also eine so genannte Ausdünnung der Pflanzenpopulation statt. Je dichter die Pflanzenpopulation wird, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit des Absterbens der Pflanzen.

In einer gemischten Pflanzenpopulation, in der die Sterblichkeit einer Pflanzensorte von der Dichte einer anderen abhängig ist, spricht man generell von *Ausdünnung*. Diese Ausdünnungen kommen bei den meisten Pflanzenpopulationen vor. Als *Selbst-Ausdünnung* zeichnet man einen Prozess, bei dem die Anzahl der Pflanzen in der Population durch Konkurrenz zwischen Pflanzen derselben Art vermindert wird [48, 53].

Die Gesetzmäßigkeit der Selbst-Ausdünnung infolge von Wechselbeziehung zwischen der Bestandsdichte und der Wachstumschance der Einzelpflanze wurde erstmals von Yoda et al. [48, 53] beschrieben. Das Gesetz der räumlichen Alometrie wird durch folgende Gleichung definiert:

$$w = bD_m^{-k}, \quad (2.15)$$

Dabei ist D_m die maximale Dichte in einer realen Population und w das durchschnittliche Trockengewicht pro Pflanze. Durch die Anwendung des Logarithmus wird die üblichere Notation erhalten:

$$\log w = \log b - k \log D_m \quad (2.16)$$

bzw.

$$B = \log w + k \log D_m. \quad (2.17)$$

Hier ist B der Logarithmus der Pflanzendichte, und k ist eine Konstante, ($k=3/2$). Das Auftragen des Logarithmus der Pflanzendichte gegen den Logarithmus des durchschnittlichen Trockengewichts erzeugt eine Gerade (siehe Abbildung 2.6) [53].

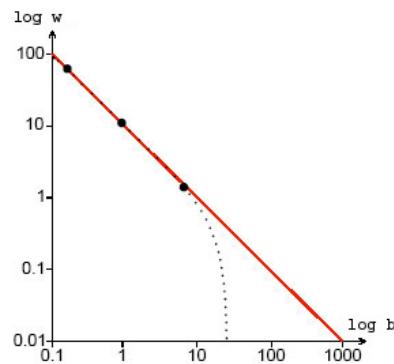


Abbildung 2.6: Anzahl Pflanzen und Gewicht einer Population nach Potenzgesetz, Quelle: [75].

Kapitel 3

Relevante Vorarbeiten

Auf Grund der hohen Relevanz für bestimmte Forschungsbereiche wie beispielsweise die Biologie, Botanik, und Filmindustrie, haben sich viele Forscher in der Computergraphik und anderen Wissenschaften mit der Simulation und Visualisierung der Entwicklung von Pflanzenpopulationen beschäftigt. Es wurden bisher unterschiedliche Methoden und Verfahren vorgestellt, um die Entwicklung und das Wachstum der Pflanzenspopulationen naturgemäß zu visualisieren und zu simulieren.

In diesem Kapitel beschreibe ich die wichtigsten Methoden im Bereich der Simulation und Modellierung von Pflanzen. In den Abschnitten 3.1, 3.2 und 3.3 werden die grundlegenden Methoden für die Herstellung und Visualisierung und damit für die Modellierung von Pflanzen diskutiert, die ich in meiner Arbeit angewandt habe. Abschnitt 3.4 zeigt Arbeiten im Bereich der Wechselwirkung zwischen Pflanzen und ihrer Umgebung. Vorhergehende Arbeiten, die das Modellieren komplizierter Ökosysteme behandeln, werden im Abschnitt 3.5 dargestellt. Abschnitt 3.6 gibt einen Überblick über die Anwendung von Kachelungsverfahren im Bereich der Pflanzenverteilung.

3.1 Prozedurale Verfahren

Prozedurale Verfahren sind parametrisierbare Algorithmen, die zur Erzeugung einer Pflanzenart verwendet werden. Dan Cohen hat im Jahre 1967 [22] das erste prozedurale Verfahren zur Modellierung von Verzweigungsstrukturen implementiert (siehe Abbildung 3.1(a)). Ein weiteres prozedurales Modell zur Verzweigungsstruktur von Bäumen wurde von Honda [36] sowie Fisher und Honda [41, 42] vorgestellt. Hier entstehen zum ersten Mal dreidimensionale Baumske-

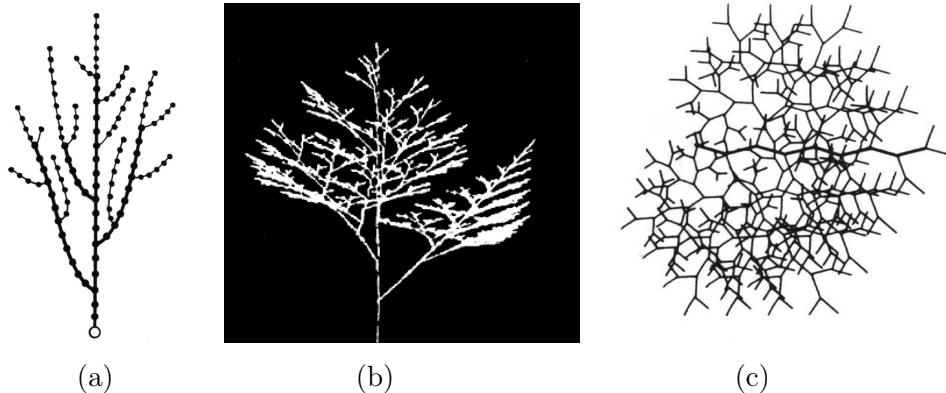


Abbildung 3.1: *a)* Kontinuierliche Verzweigungsstrukturen nach Cohen, Quelle: [22]; *b)* dreidimensionale Baumskelette nach Honda, Quelle: [36]; *c)* Verzweigungsbildung bei Terminalia Catappa nach Honda, Quelle: [4].

lette (siehe Abbildung 3.1(b)). Honda et al. [4] entwickelte einen Mechanismus, der Verzweigungsvorgang reguliert (siehe die Abbildung 3.1(c)).

Mitte der achtziger Jahre beschäftigt sich Mandelbrot [11, 16] mit fraktalen Erzeugungsprozessen, um natürliche Objekte zu erzeugen. Diese Prozesse sind meist rekursiver Natur, weil fraktale Objekte Selbstähnlichkeit haben. Ein rekursiver prozeduraler Algorithmus wurde von Oppenheimer [82] verwendet, um die Verzweigung entlang eines Stammes zu erzeugen (siehe Abbildung 3.2(a)).

Bloomenthal [43, 44] hat geometrische Modellieraspekte mit einbezogen, um Bäume besonders realistisch zu erzeugen. Auch hier wird die Verzweigungsstruktur durch einen rekursiven Algorithmus dargestellt. Die Kontrollpunkte, die mit diesem Verfahren erzeugt werden, werden über Spline-Interpolation stetig verbunden. Bloomenthal erstellt sattelförmige Flächen zwischen den beiden verzweigenden Strängen, um die natürliche Verzweigung realistischer darzustellen (siehe Abbildung 3.2(b)).

3.2 Regelbasierte Verfahren

Aristid Lindenmayer (1925-1989) entwickelte ein Modell, welches mit Hilfe von einigen Produktionsregeln Entwicklungsstadien bestimmter Pflanzen beschreibt. Diese Systeme werden heute L- oder Lindenmayer Systeme genannt [6, 5]. In der Zusammenarbeit zwischen Lindenmayer und Przemyslaw Prusinkiewicz wurden die mathematischen Grammatiken mit Hilfe der sogenannten Turtle-Grafik [35] für die Computergraphik einsetzbar gemacht [84, 83].



Abbildung 3.2: a) Fraktales Baummodell, Quelle: [82]; b) Prozedurales Baummodell nach Bloomenthal, Quelle: [44].

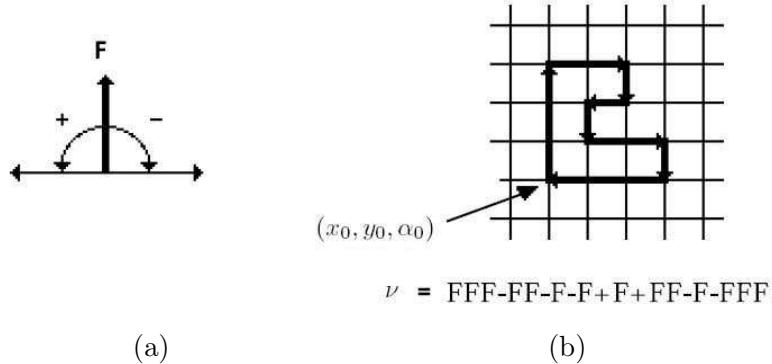


Abbildung 3.3: a) Die Turtle-Interpretation der Zeichenkettesymbole $F, +, -$. b) Die Interpretation einer Zeichenkette. Die Winkeländerung δ ist gleich 90° . Die anfängliche Zustand (x_0, y_0, α_0) , Quelle: [84].

L-Systeme sind Textersetzungssysteme. In einem Textersetzungssystem wird die Erzeugung komplizierter Objekte durch sukzessive Ersetzung der Teile eines einfachen initialen Objekts über einen Regelsatz oder ein Produktionensystem durchgeführt.

Die Schildkröten (Turtle)-Interpretation wird durch ein so genanntes formales Tripel (x, y, α) definiert, wobei (x, y) die Position der Schildkröte darstellt. Der Winkel α ist ihre Kopfrichtung, d.h. die Richtung, in welche die Schildkröte laufen soll. Die Schildkröte läuft immer geradeaus, solange kein Hindernis während der Bewegung vorhanden ist. Ist ein Hindernis vorhanden, muss die Schildkröte neu ausgerichtet werden. Ist die Schrittgröße d und die Winkeländerung δ vorgegeben, wird die Bewegung der Computer-Schildkröte durch folgende vier Fahrbefehle dargestellt (siehe Abbildung 3.3a):

- F Bewege Turtle um d in aktueller Richtung, zeichne eine Line: $(x, y, \alpha) \rightarrow (x + d \cos \alpha, y + d \sin \alpha, \alpha)$.
- f Bewege Turtle um d in aktueller Richtung, ohne etwas zu zeichnen: $(x, y, \alpha) \rightarrow (x + d \cos \alpha, y + d \sin \alpha, \alpha)$.
- +
- Drehe nach links durch den Winkel δ .
 $(x, y, \alpha) \rightarrow (x, y, \alpha + \delta)$.
-
- Drehe nach rechts durch den Winkel δ .
 $(x, y, \alpha) \rightarrow (x, y, \alpha - \delta)$.

In Abbildung (3.3b) ist der anfängliche Zustand (x_0, y_0, α_0) und die Winkelerhöhung $\delta = 90^\circ$ für die Zeichenkette ν angegeben.

Um in der Natur vorkommende Verzweigungen darstellen zu können, wird das Alphabet um folgende Symbole erweitert:

- [Der aktuelle Zustand der Turtle wird auf einem Stack gespeichert.
-] Das oberste Element des Stacks wird zum neuen Zustand der Turtle. Beim Wechsel in den neuen Zustand wird keine Linie gezogen.

In Abbildung 3.4 ist dargestellt, welche Formen man mit solchen geklammerten L-Systemen erzeugen kann.

Die Interpretation mit Hilfe der Turtle Grafik kann auch auf den 3D Raum erweitert werden. Die Orientierung der Turtle wird dann mit 3 Vektoren \vec{H} , \vec{L} , \vec{U} dargestellt. \vec{H} zeigt in die Blickrichtung der Turtle (heading), \vec{L} nach links (left) und \vec{U} nach oben (up).

Alle Pflanzen, die mit konventionellen L-Systemen erzeugt werden, sind deterministisch. Um die Gleichmäßigkeit in den Verzweigungsstrukturen zu vermeiden, muss eine stochastische Änderung, welche das allgemeine Aussehen einer Pflanze verändert, auf die Strukturen erzeugt werden. In Abbildung 3.5 sind zwei

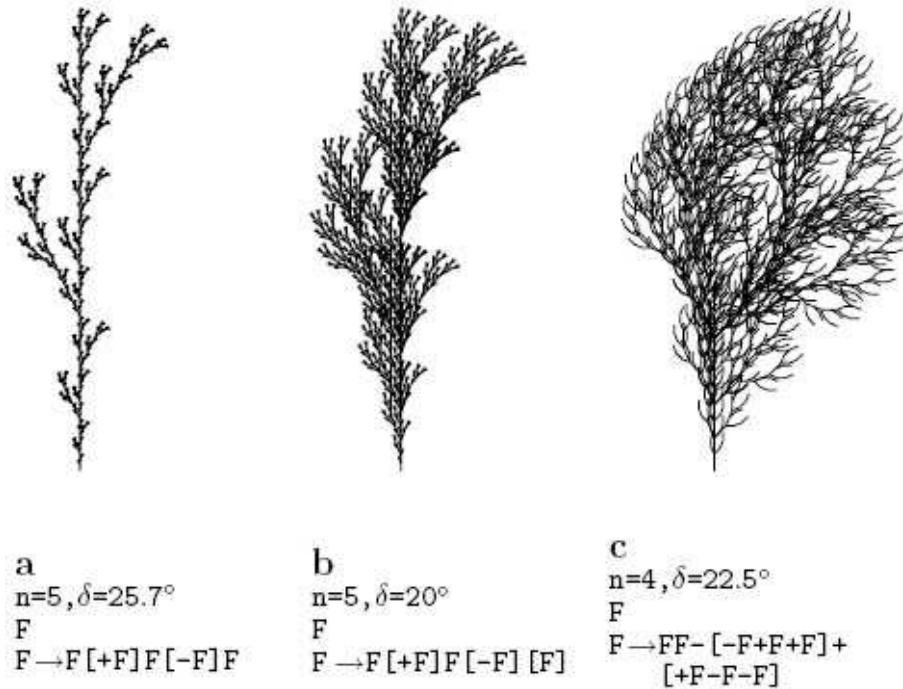


Abbildung 3.4: Beispiele geklammerter L-Systeme (Bilder: P. Prusinkiewicz).

stochastische L-System dargestellt, hier wurde der Verzweigungswinkel zufällig variiert.

Mit den bisher beschriebenen L-Systemen sind jedoch die Modellierungsmöglichkeiten eingeschränkt, beispielsweise lassen sich nur der vorgegebene Winkel δ und der Strecke d darstellen. Um auch beliebige Winkel und Strecken darstellen zu können, werden die parametrisierten L-Systeme eingeführt.

Prusinkiewicz et al. [90] entwickelte kontextsensitive (Umweltsensitive) Erweiterungen des parametrischen L-Systems. In [50, 85, 87] werden parametrische L-Systeme mit einem Schildkröten-Grafik-Interpreter ausführlich dargestellt. In einer Zeichenkette repräsentiert jedes zusammenpassende Paar der eckigen Klammern jeweils eine Verzweigung. In jedem Schritt, der rekursiven Regeln oder der Produktionen werden alle Module in der Vorgängerzeichenkette (Predecessor) durch Nachfolgermodule (Successor) ersetzt. Generell hat eine Produktion das folgende Format:

$$id : lc < pred > rc : cond \rightarrow succ : prob$$

Wobei id der Produktionsbezeichner ist, lc , $pred$, und rc sind der linke Kontext, der Vorgänger (Predecessor), und der rechte Kontext entsprechend, $cond$ ist

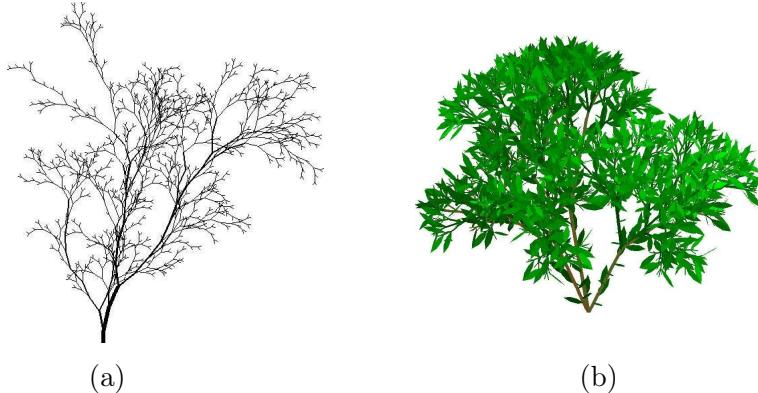


Abbildung 3.5: Stochastische dreidimensionale L-Systeme [89].

die Kondition. *succ* ist der Nachfolger, und *prob* ist die Wahrscheinlichkeit der Anwendung der Produktion. Zum Beispiel besteht das folgende L-System aus Axiom *w* und drei Produktion *p₁*, *p₂*, und *p₃*.

L – System1

$$w : A(1)B(3)A(5)$$

$$p_1 : A(x) \rightarrow A(x + 1) : 0.4$$

$$p_2 : A(x) \rightarrow B(x - 1) : 0.6$$

$$p_3 : A(x) < B(y) > A(z) : y < 4 \rightarrow B(x + z)[A(y)]$$

Im Gegensatz zu der parallelen Anwendung der Produktionen in jedem Ableitungsschritt geschieht die Interpretation der resultierenden Zeichenketten sequentiell [85, 86, 87]. Zu jedem Zeitpunkt wird die Schildkröte mit einem Positionsvektor \vec{P} und drei gegenseitigen senkrechten orientierten Vektoren \vec{H} , \vec{U} , und \vec{L} gekennzeichnet.

3.3 Regelbasierte Objekterzeugung

In der regelbasierten Objekterzeugung werden die beiden Ansätze des prozeduralen Modellierens und der regelbasierten Verfahren kombiniert, um effiziente Modellierungssysteme wie *Xfrog* Software [14, 15, 72, 73] zu erzeugen. Hier besteht jede repräsentierte Pflanze aus einer Kombination von Komponenten. Um die Komponente, die Teile der Pflanzengeometrie wie Blätter, Äste oder einfache Grafik-Primitive darstellen, zu erzeugen, wird das prozedurale Verfahren eingesetzt. So können die regelbasierte Verfahren verwendet werden, um die

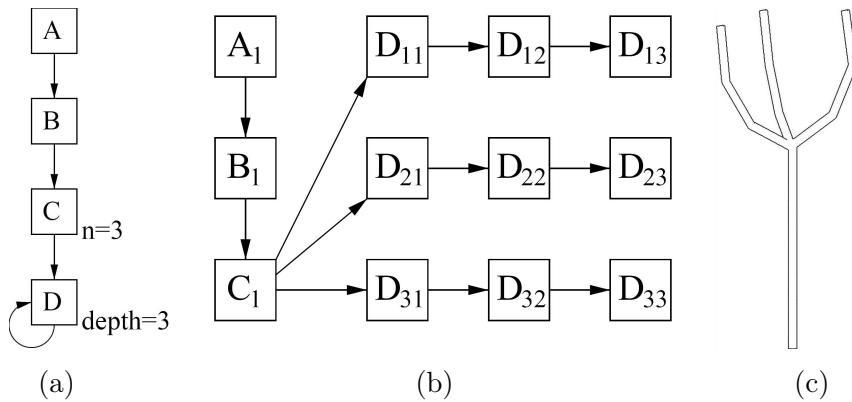


Abbildung 3.6: Herstellung der Geometrie: a) Der Benutzer definiert den p-Graphen; b) zur Generierung der Geometrie wird ein temporärer i-Baum erzeugt; c) resultierende Geometrie.



Abbildung 3.7: Teile einer Sonnenblume mit entsprechenden p-Graphen nach Deussen, Quelle: [74]; a) Blatt mit Stiel; b) Blütengrund; c) Blüte mit Samen; d) Stiel; e) fertige Pflanze

Geometrie der verschiedenen Komponenten zu modifizieren. z.B. die Krümmungen entlang einer Blattachse.

Ein gerichteter Graph von Komponentenprototypen (P-Graph) wird eingesetzt, um eine Pflanze zu erzeugen. Der Graph stellt das Regelsystem dar, und seine Kante definiert Erzeugungsregeln bzw. Erzeugungsabhängigkeit zwischen den Komponenten. Ein sogenannter i-Baum wird durch Traversierung des p-Graphs zur Geometrieerzeugung aufgebaut (siehe Abbildung 3.6). Die Verbindung zwischen den Komponenten im p-Graph können verschiedener Natur sein: *Child – Link*, *Branch/Rib – Link* und *Leaf – Link*. In der Abbildung 3.7 sind Stufen des *i – Baums* zur Herstellung einer Sonnenblume dargestellt.

3.4 Die Wechselwirkungen zwischen Pflanzen und ihrer Umgebung

Die Wechselwirkungen zwischen den Pflanzen und ihrer Umgebung ist der Hauptfaktor, der die Entwicklung der Pflanzen und des Pflanzenökosystems beeinflusst. Prusinkiewicz et al. [90] und Mech et. al. [94] haben auf diesem Gebiet führende Arbeit geleistet. Przemyslaw et al. [90] entwickelte kontext-sensitive Erweiterungen des parametrischen L-Systems.

In einem kontext-sensitiven (Umweltsensitive) L-System können die lokalen Aspekte der Umgebung das Modell beeinflussen. Hierzu werden Anfragesymbole der Form $?X(x, y, z)$, $X = \vec{P}, \vec{H}, \vec{U}, \vec{L}$ in der Sprache eingeschlossen. Während der Interpretation der Zeichenkette legen diese Symbole die Position oder die Orientierung fest.

Im ersten Fall ($X = P$) repräsentieren die Werte x, y, z die Position der Schildkröte. Im zweiten Fall ($X = \vec{H}, \vec{U}, \vec{L}$) repräsentieren die Werte x, y, z die Koordinaten des Richtungsvektors im Koordinatensystem. Im zweidimensionalen Fall kann die Z-Koordinate ausgelassen werden. z.B. wird ein kontext-sensitive L-System in der folgenden Form dargestellt:

L – System2

$$w : A$$

$$p_1 : A \rightarrow F(1)?P(x, y) - A$$

$$p_2 : F(k) \rightarrow F(k + 1)$$

In Abbildung 3.8 sind mehrere kontextsensitive Verzweigungsstrukturen dargestellt.

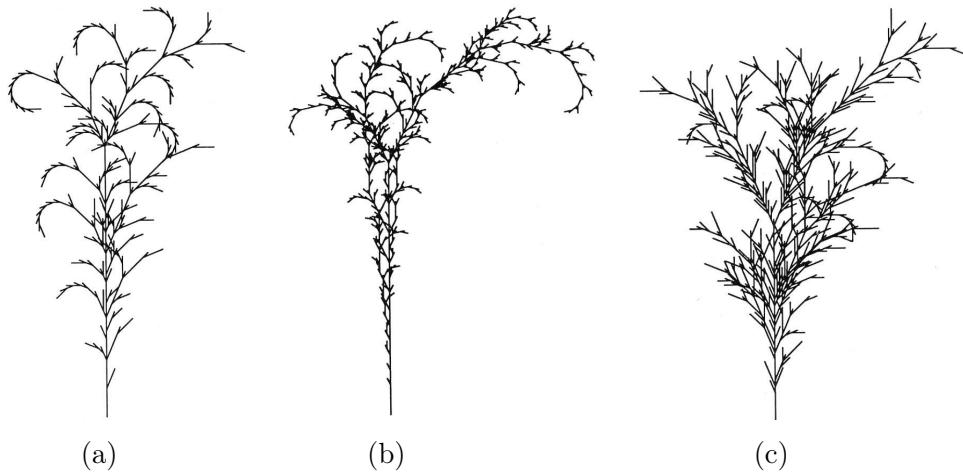


Abbildung 3.8: Verzweigungsstrukturen erzeugt aus kontextsensitiven L-Systemen nach Hogeweg und Hesper, Quelle: [80] (Bilder: P. Prusinkiewicz).

Mech et al. [94] haben einen breiten Bereich der Interaktion zwischen den Pflanzen und ihrer Umgebung auf dem Niveau der Pflanzenarchitektur simuliert und visualisiert. Die Interaktion einer Pflanze mit der Umgebung kann in parallel laufenden kommunizierenden Prozessen zusammengefasst werden. Die Anwendung dieser Prozesse ist in Abbildung (3.9) dargestellt. Der Wachstumsprozess der Pflanze wird durch folgende Funktionen durchgeführt:

- Empfang der Informationen über die Umwelt in Vektorform, welche die wahrgenommenen Anregungen durch spezifische Pflanzenorgane simulieren.
- Transport und Bearbeitung der Informationen innerhalb der Pflanze.
- Erzeugung der Reaktion (Rückmeldung) in Form von Wachstumsänderungen und direktem Exportieren der Informationen zur Umwelt.

Gleichzeitig zum Wachsen der Pflanze wird die Veränderung der Umwelt simuliert. Dieser Prozess schließt folgende Schritte ein:

- Empfang der Pflanzeninformationen.
- Simulation der internen Prozesse in der Umwelt.
- Darstellung der geänderten Umweltinformationen in einer Form, die durch den Pflanzenprozess verstanden werden kann.

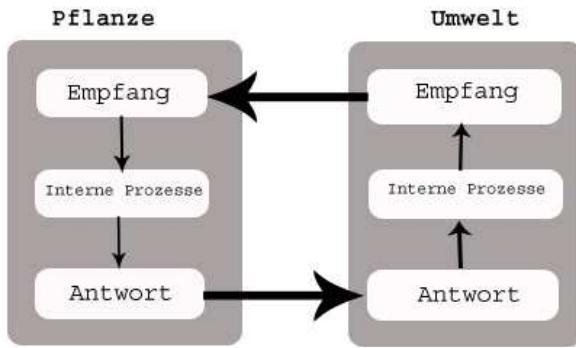


Abbildung 3.9: Die Skizze des Interaktionsprozesses zwischen eine Pflanze und ihre Umwelt, Quelle: [94].

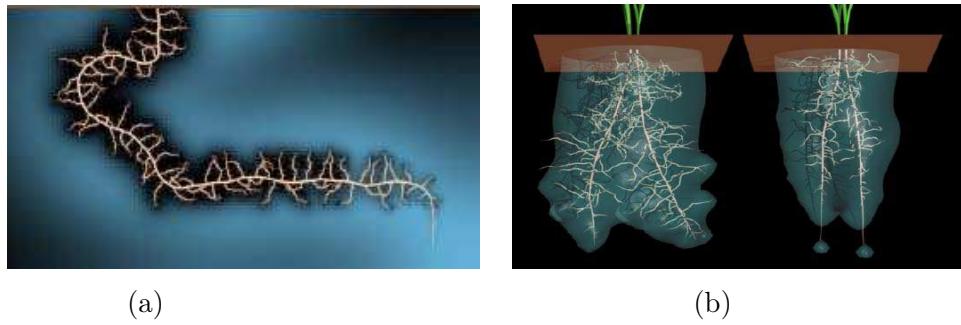


Abbildung 3.10: Die Wechselwirkung zwischen den Pflanzen und der Umwelt für Wasser. a) Ein zweidimensionales Modell einer Wurzel, die mit dem Wasser im Boden interagiert, Quelle: [94]. b) Eine dreidimensionale Erweiterung des Wurzelmodells, Quelle: [94].

Dieses Modell wird verwendet, um die unterschiedlichen Konkurrenzarten zwischen den Pflanzen um Umweltressourcen zu visualisieren. z.B. Die Konkurrenz um Raum [4, 3], die Konkurrenz zwischen den Pflanzenwurzeln um Nährstoffe und Wasser [108, 20], und die Konkurrenz um Licht zwischen dem dreidimensionalen Spross einer krautigen Pflanzen und der Verzweigungsstruktur der Bäume [71, 69].

Das Umweltmodell führt die folgenden Kommunikationsprozesse zwischen der Pflanzenwurzel und der Umwelt aus: (i) die Umwelt gibt das angeforderte Wasser an die Spitze der Wurzel ab, die in einem gewissen Bereich positioniert ist. (ii) Die Menge des Wassers wird von der gesamten Menge verringert. (iii) Der Umweltprozess berechnet ebenfalls eine lineare Kombination \vec{T} zwischen L-System-Vektor \vec{H} und dem Gradient der Wasserkonzentration ∇C . Dann wird ein Winkel θ zwischen Vektor \vec{T} und Vektor \vec{I} zurückgegeben. Dieser Winkel

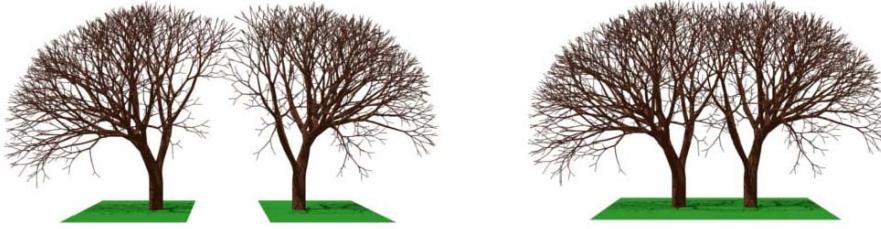


Abbildung 3.11: Gesamtform Zweier Bäume, Quelle: [94].

wird vom Wurzelmodell verwendet. Das Wurzelmodell übernimmt den Winkel θ und die Menge des Wassers, dann werden folgende Schritte ausgeführt: (i) Die Entwicklung fängt mit einer Wurzelspitze A an. Die Parameter der Wurzelspitze stellen die Richtung der Spitze, aktuelle Länge der Achse, und den Abstand zum nächsten Verzweigungspunkt dar. (ii) Die Menge des Wassers wird von der Wurzelspitze aufgenommen. (iii) Das neue Segment wird im Bezug auf den Winkel θ gedreht. (iv) Das Wurzel-Modell exportiert die Information des neuen Segments zum Umweltmodell. Eine einfache zweidimensionale und dreidimensionale Struktur wird mit dem zuletzt beschriebenen Model gezeigt (siehe Abbildung (3.10. a und b)).

Ein anderes Beispiel für den Kommunikationsprozess ist die Konkurrenz um Licht. In der Abb.(3.11) wird dieser Mechanismus zum Erzeugen einer Verzweigungsstruktur mit der Berücksichtigung der Konkurrenz um Licht und Raum verwendet. Die kleineren Zweige interagieren miteinander, um eine vorgegebene Dichte nicht zu überschreiten. Werden zwei Bäume nebeneinander gepflanzt, so bilden sie ein Gesamtsystem Abb.(3.11).

3.5 Modellierung von Ökosystemen

Die Modellierung, das Visualisieren und das Erzeugen komplexer Ökosysteme ist aufwendig im Hinblick auf die hohe Anzahl der Pflanzen und die daraus resultierende Menge der Geometriedaten.

Um dieses Problem zu vereinfachen, wird in einer Arbeit von Reeves und Blau [109], die im Rahmen einer Filmproduktion erstellt wurde, das Vorgehen in vier Teilbereiche untergliedert: (i) Erzeugung von Terrain und Bodenfaktoren. (ii) Spezifikation der Pflanzenverteilung. (iii) Modellierung der Einzelpflanzen. (iv) Bilderzeugung. Diese sukzessiv aufeinander folgenden Untergliederungen werden

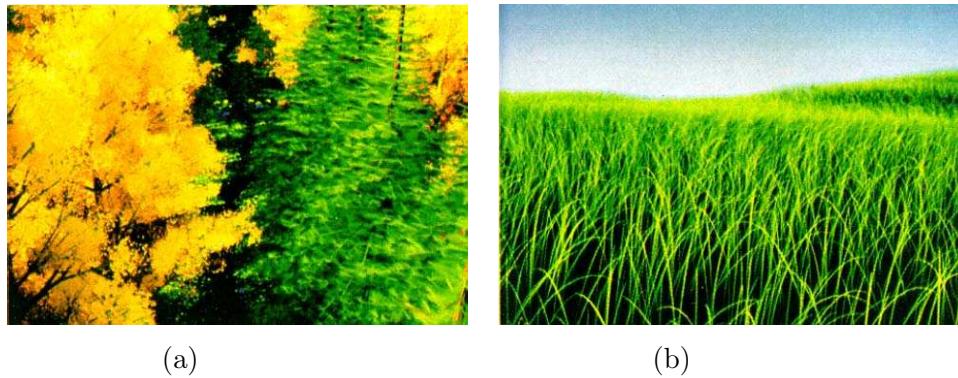


Abbildung 3.12: Modellieren eines komplizierten Ökosystems. a) Eine Waldsze-
ne, Quelle: [109]. b) Ein Feld vom Gras, Quelle: [109].

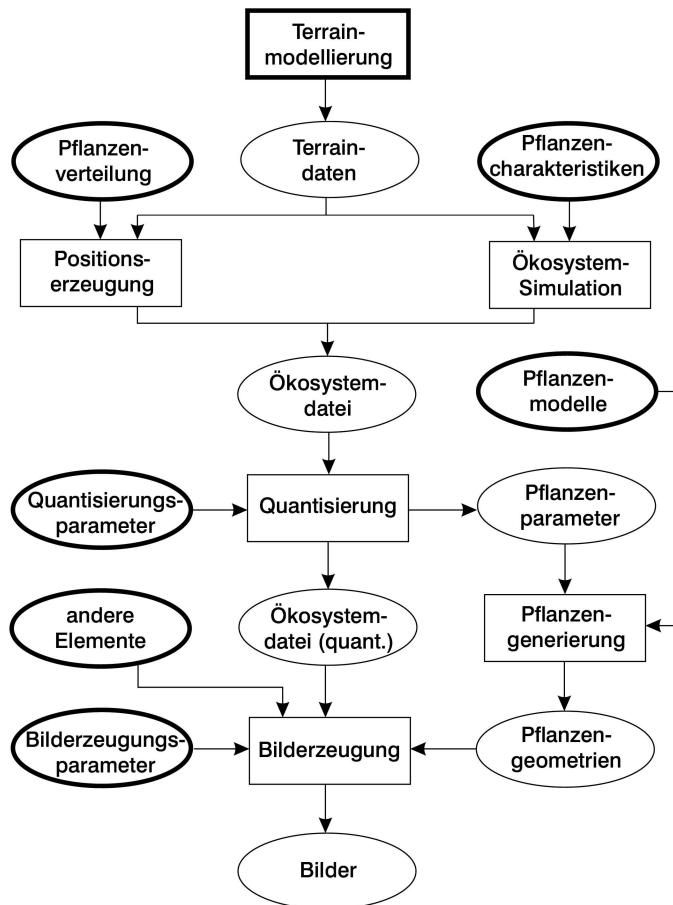


Abbildung 3.13: Offene Systemarchitektur zum Modellieren und Visualisieren
von Bewuchs, Quelle: [75].

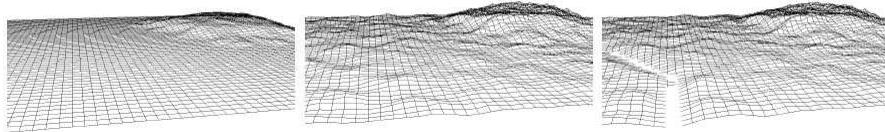


Abbildung 3.14: Drei Stufen in der Erzeugung des Terrains, Quelle: [75].

als Pipeline bezeichnet. Die Abbildung (3.12) zeigt zwei Szenen als Anwendung dieser Pipeline.

Ähnliche Pipelines wurden schon für die Simulation von Vogelschwärmen [21], komplexen phyllotaktischen Mustern [26] und von morphogenetischen Erzeugungsprozessen angewendet [52].

Deussen et al. [75] entwickelten ein neues Verfahren, welches ebenfalls die Pipelinetechnik einschließt. Dieses Verfahren ist in folgende Schritte untergliedert (siehe Abbildung (3.13)):

- Modellierung von Terrain

Um ein Terrain zu erzeugen, werden fraktale Funktionen verwendet. Ein mit solchen Funktionen erzeugtes Bild ist in Abb. (3.14) dargestellt.

- Beschreibung der Pflanzenpopulation

Deussen et.al [75] haben zwei Methoden für die Spezifikation der Pflanzenverteilung beschrieben. Die erste Methode ist die interaktive Spezifikation. Diese Methode ist sehr sinnvoll für die Darstellung unterschiedlicher Pflanzengesellschaften in Gärten, Parks, urbanen Landschaften sowie großer Teile von Kulturlandschaften.

Um eine Pflanzenpopulation auf einem Terrain zu spezifizieren, malt der Benutzer ein Bild in unterschiedlichen Grautönen. Der Grauwert wird verwendet, um die Parameter von Pflanzenpopulationen zu spezifizieren. Hierzu wird pro Bild ein minimaler und maximaler Wert angegeben, der den schwarzen bzw. weißen Pixeln entspricht. Sobald die Position der Pflanze festgelegt worden ist, werden ihre Parameter aus den Pixeln der Parameterbilder ermittelt. Die Parameter kontrollieren hierbei das Pflanzenmodell.

Die zweite Methode ist die Simulation eines Ökosystems. Um Entwicklung einer Pflanzenpopulation zu simulieren, gibt es verschiedene Ökosystem-Modelle. In Abbildung 3.15 wird die Veränderung im Wachstum und in der Anzahl der Pflanzen in einer Population mit der Zeit simuliert.

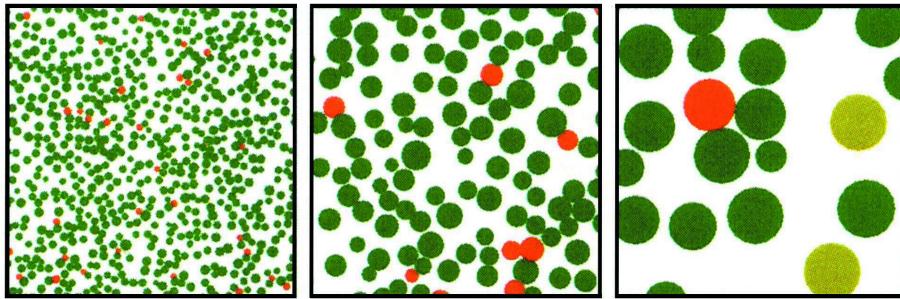


Abbildung 3.15: Simulierte Wachstum einer Pflanzenpopulation, Quelle: [75].

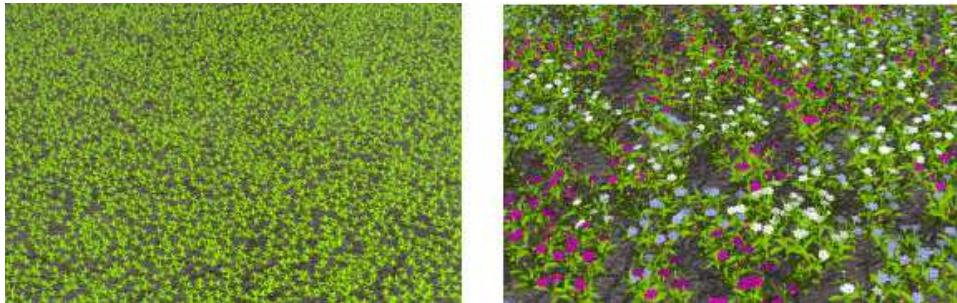


Abbildung 3.16: Simulierte Wachstum einer Pflanzenpopulation, Quelle: [75].

- Modellierung der Pflanzen

Es gibt unterschiedliche Methoden, um Pflanzen zu modellieren. Dabei sind prozedurale Modellierungen, regelbasierte Modellierungen, und interaktive Modellierungen die Hauptmethoden.

- Rendering

Um eine natürliche Szene darzustellen, müssen zwei Hauptprobleme berücksichtigt werden. Das Erste ist die Komplexität der Szene, und das Zweite ist Berechnung der Beleuchtung der Pflanze und der atmosphärischen Effekte. Deussen et.al. [75] haben zwei unterschiedliche Verfahren in ihrem Ökosystem verwendet, um diese Probleme zu lösen.

Im ersten Verfahren wird die Szene in Subszenen mit kontrollierbarer Komplexität unterteilt und dann wird jede Subszene unabhängig voneinander mit der Verwendung von *Ray-Casting* gerendert. Das zweite Verfahren ist die Verwendung eines speziellen *Ray-Tracings*, welches Parallelisierung effizient ermöglicht.

Die Abbildungen (3.16) und (3.17) wurden mit der Anwendung von Deussen et.al. erstellt [75].



Abbildung 3.17: Simulierte Wachstum einer Pflanzenpopulation, Quelle: [75].

3.6 Kachelbasierte Beschreibungsverfahren

Um die Speicherung der Daten und den Modellieraufwand für die Darstellung einer großen Pflanzenpopulation zu reduzieren, kann die Fläche, auf welche die Pflanzen verteilt werden, in Vierecke (Kacheln) zerlegt werden. Auf jede Kachel wird ein kleiner Teil der Pflanzen verteilt. Um eine große Pflanzenpopulation auf einer Fläche darzustellen, werden die Kacheln auf der Fläche wiederholt. Dieses Verfahren hat einige Nachteile, obwohl es eine große Pflanzenpopulation mit erheblicher Reduktion des Aufwandes für die Speicherung und Modellierung erzeugt. Einer dieser Nachteile ist, dass es schwierig ist, das Kriterium der Kreisscheiben einzuhalten. Es ist besonders bei einer Poisson-Disk-Verteilung insbesondere an den Rändern der Kacheln problematisch.

Hiller et.al in [100] haben dieses Problem gelöst, indem sie eine lokale Optimierung auf jede Kachel anwenden, und dann diese Kacheln periodisch anordnen (siehe Abbildung 3.18).

Ein anderer Nachteil ist die Periodizität der Kacheln, die einen Wiederholungseindruck in der Szene erzeugen (siehe Abbildung (3.19) a). Hier wurde eine Kachel mit 160 Sonnenblumen über der Fläche wiederholt. Die Wiederholungen sind erkennbar, trotzdem die Anzahl der Pflanzen pro Kachel groß ist.

Cohen et.al [29] haben eine aperiodische Kachelung, die so genannten Wang-Kacheln angewendet, um dieses Problem zu lösen. Außerdem stellen sie neue Methoden vor, um die Kacheln mit 2D-Textur, 2D-Poisson-disk Verteilung oder 3D-Geometrie zu füllen. Wang Kacheln sind Vierecke, deren Ränder mit jeweils einer bestimmten Farbe markiert sind. Ein Beispiel für ein Wang-Tile-Set wird in Abbildung 3.20 dargestellt. Um eine Fläche mit den Kacheln zu füllen,

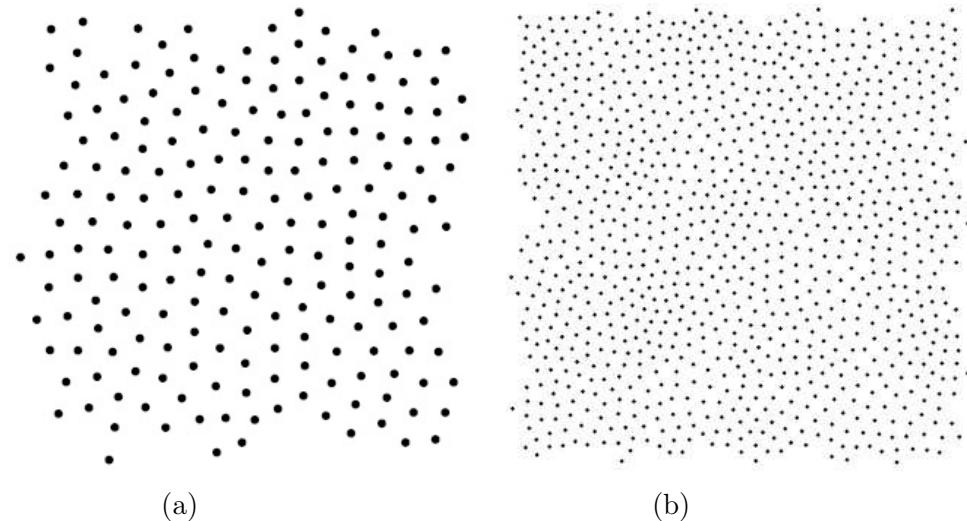


Abbildung 3.18: periodische Anordnung, a) lokale Verfeinerung auf einer Kachel, b) periodische Kachelung zu einer Fläche, Quelle: [100].

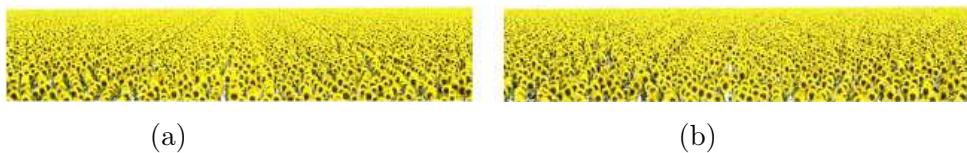


Abbildung 3.19: a) Darstellung einer Pflanzenpopulation mit periodischer Kachelung, b) Darstellung einer Pflanzenpopulation mit nicht-periodischen Kachelung, Quelle: [29].

dürfen nur Kacheln aneinander gesetzt werden, deren Farben an den Rändern übereinstimmen (siehe Abbildung (3.21)). In Abbildung 3.19.b wird eine Sonnenblumenpopulation über acht Kacheln dargestellt, die aperiodisch wiederholt werden.

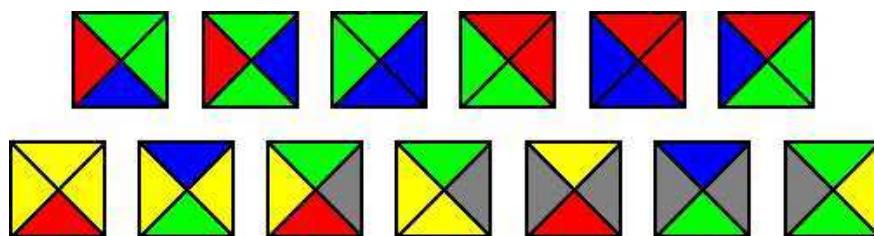


Abbildung 3.20: Ein Menge von Wang-Kacheln mit 13 farbcodierten Kacheln nach K. Culik, Quelle: [51].

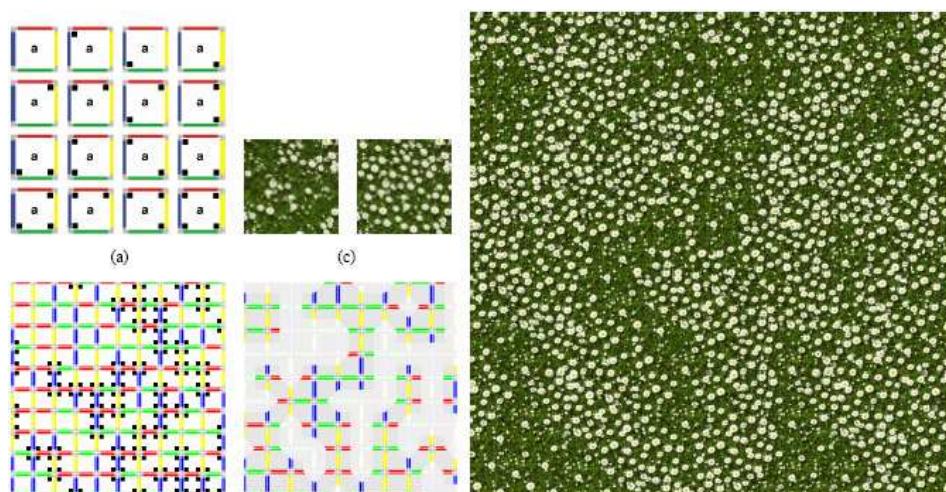


Abbildung 3.21: Die Beseitigung des Eckenproblems, Quelle: [29].

Kapitel 4

Symmetrische und Asymmetrische Konkurrenz

In diesem Kapitel stelle ich eine neue Methode für die Darstellung der Pflanzenkonkurrenz und die Entwicklung von Pflanzenpopulationen vor, welche es ermöglicht, das Gleichgewicht zwischen der Pflanzendichte und der Pflanzenverteilung in visuellen Modellen großer Ökosysteme zu bestimmen. Die Methode besteht darin, die Pflanzenkonkurrenz in eine symmetrische und asymmetrische Konkurrenz zu unterteilen.

Asymmetrische Konkurrenz findet statt, wenn die Pflanzen sich in ihrer Größe und/oder in ihrer Art unterscheiden und in einer Konkurrenzsituation eine Pflanze alle Nährstoffe erhält. Als eine Erweiterung zu dieser Methode werden Seed-Banking Pflanzen und Nicht-Seed-Banking Pflanzen berücksichtigt. Der Unterschied zwischen Seed-Banking Pflanzen und Nicht-Seed-Banking ist, dass die von einer Seed-Banking Pflanze produzierte Samen nicht in regelmäßigen Intervallen keimen, sondern für eine unbestimmte Zeit ruhen. Das Verfahren wurde in „Modeling and Visualization of Symmetric and Asymmetric Plant Competition“ [60] erstmals publiziert.

Dieses Kapitel ist wie folgt untergliedert: zuerst wird die symmetrische und asymmetrische Konkurrenz diskutiert. Dann beschreibe ich das allgemeine Modell und das Verhalten der Pflanzen einschließlich des Wachstums- und Reproduktionsprozesses, wobei zwischen einer symmetrischen und asymmetrischen Konkurrenz um Ressourcen unterschieden wird. Schließlich wird die Methode beschrieben und die Resultate erörtert.

4.1 Motivation

Simulation und Visualisierung der Pflanzenkonkurrenz ist ein wichtiges Forschungsgebiet nicht nur in der Ökologie, wo sie hilft Bedingungen in der Zukunft zu errechnen, sondern auch in Bereichen wie Biologie, Landschaftsplanung und Stadtarchitektur. Zusätzlich können die Methoden eingesetzt werden, um schönere und realistische Szenen für die Computergraphik zu erzeugen, die im Bereich der Filmproduktion, bei Computerspielen und in den Kunst angewendet werden.

Diese Methoden berücksichtigen differenzierte Bedingungen für die Pflanzen wie beispielsweise verschiedene Arten, sowie das Alter und die Größe der Pflanzen. Im Gegensatz zu bisherigen Methoden wird es durch eine Unterteilung in eine symmetrische und asymmetrische Konkurrenz möglich, die Interaktion zwischen den Pflanzen unterschiedlicher Größen und Arten genauer zu simulieren. Die Erfassung der Interaktion ist besonders wichtig für die Visualisierung der Konkurrenz zwischen unterschiedlichen Ökosystemen und solchen Systemen, welche aus vielen unterschiedlichen Pflanzensorten bestehen. Die asymmetrische Konkurrenz ist ebenfalls ein wichtiger Faktor für die genaue Simulation der Pflanzenpopulation in der Computergraphik.

Die Simulation und die Visualisierung der Pflanzenkonkurrenz wurden während der letzten Jahre von vielen Autoren in der Computergraphik behandelt. Es gibt zwei unterschiedliche Modelle für die Simulation von großen Ökosystemen [13].

Das erste Modell ist ein bottom-up Verfahren, in dem das Ökosystem durch die Konkurrenz der einzelnen Pflanzen um Nährstoffe simuliert wird.

Das zweite ist ein top-down Ansatz. Hier werden Positionen der einzelnen Pflanzen von gegebenen großräumigen Dichteverteilungen entnommen. In diesem Kapitel befassen wir uns mit dem ersten Modell, und stellen eine neue Methode für eine effiziente Simulation vor.

Im Allgemeinen können die bottom-up Ansätze in zwei Kategorien eingeteilt werden. In der ersten Kategorie werden Pflanzen ohne genaue Kenntnisse des internen Prozesses modelliert. In der zweiten Kategorie werden die Pflanzeneigenschaften durch die Simulation der internen Prozesse erzeugt. Dazwischen finden sich viele weitere Methoden, die das Verhalten der Pflanzen auf Grund von unterschiedlichen internen Faktoren beschreiben. Ein Überblick der verschiedenen Methoden wird in [74] gegeben. Ein Tutorial für die Modellierung der Pflanzen ist in [37] enthalten.

Hoch entwickelte Modelle für Pflanzenökosysteme wurden im Kontext der Computergraphik von Mech und Prusinkiewicz in [94] vorgestellt. Bei Mech et.al. wurden die Positionen der Pflanzen stochastisch verteilt, das Licht für die Pflanzen wurde approximiert und wurde dann für die Interaktion zwischen Pflanzen verwendet.

Deussen et.al. entwickelten in [75] ein neues Modell für die Darstellung und Visualisierung einer Pflanzenpopulation. Das Modell ist geeignet, die Konkurrenz der unterschiedlichen Pflanzenarten mit einer relativ einfachen graphischen Berechnung zu simulieren. Deussen et.al. erzeugen damit realistische Bilder von Landschaften, die aus Tausenden von unterschiedlichen Pflanzenarten bestehen.

Lane und Prusinkiewiz [13] haben L-Systeme zum sogenannten Multiset L-Systemen erweitert, die für bottom-up und top-down Simulationsverfahren verwendet werden. Hier reduziert die Pflanze nicht nur die Wahrscheinlichkeit des Wachstums ihrer Nachbarpflanzen, sondern kann auch ihre Wachstumswahrscheinlichkeit erhöht. Diese Arbeit hat zu der Erzeugung realistischer Pflanzenbilder und natürlicher Pflanzenverteilungen beigetragen.

Ein interaktives Verfahren, das auf Partikelsystemen beruht, wird von Benes and Espinosa [10] vorgestellt. Die Objekte, die diese Partikel produzieren, liegen auf 3D-Oberflächen. Andere Objekte steuern das Wachstum, und beeinflussen die auf dem Pfad beweglichen Partikel durch den Bereich.

In der Ökologie wurden die meisten Arbeiten entwickelt, um Ökosysteme zu simulieren. Die meisten Simulationsverfahren wurden verwendet, um die Wuchsstärke von Pflanzen in einem gegebenen Bereich zu beschreiben, aber die Positionen der Pflanzen werden dabei üblicherweise nicht berücksichtigt. In [99] wird ein Modell eingeführt, das sich für die graphische Beschreibung der Pflanzengrößen eignet.

Im Folgende unterscheide ich zwischen zwei Arten der Pflanzenkonkurrenz: (1) Die symmetrische Konkurrenz σ_{ij} (i und j sind Pflanzen), (2) die asymmetrische Konkurrenz α_{ij} zwischen zwei Pflanzen. In den vorherigen Arbeiten der Computergraphik wurde bisher nur die symmetrische Pflanzenkonkurrenz behandelt. In diesem Kapitel werden beide Arten untersucht.

4.2 Die Pflanzenkonkurrenz

Unser Modell basiert auf dem *FON* (Field of Neighbourhood) Modell [99, 107]. Das FON Modell beschreibt die kreisförmige Zone des Einflusses um eine Pflanze

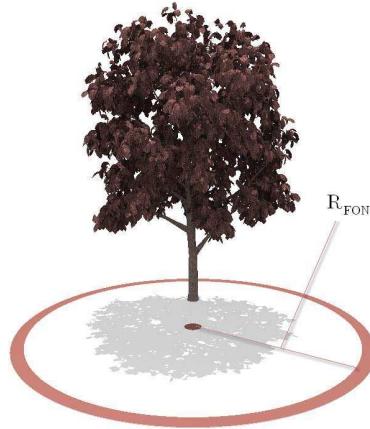


Abbildung 4.1: Die Zone des Einflusses R_{FON} hängt vom Durchmesser des Stammes ab.

herum. Der Radius dieser Zone stellt den Abstand fest, in dem die Pflanze auf benachbarte Pflanzen einwirkt. Dieser Radius ist nicht nur abhängig von der Größe der Pflanze, sondern auch von der Menge des Bodennährstoffs und dem Raum, welchen die Pflanze zum Aufsammeln der erforderlichen Menge von Nährstoffen benötigt.

Um der Umfang der Einflusszone R_{FON} festzustellen, wird eine nichtlineare Funktion des basalen Radius der Pflanzen R_{basal} verwendet [64] (siehe Abbildung (4.1)).

$$R_{FON} = d (R_{basal})^b. \quad (4.1)$$

Wobei d und b Konstanten sind, gewöhnlich ist d im Intervall [1..15] und b in [0..1].

Als initialer Zustand wird eine bestimmte Anzahl von Pflanzen zufällig auf einen Bereich verstreut. Der Bereich ist durch unterschiedliche Graufarben dargestellt, welche die Menge der Nährstoffe beschreiben. Das Pflanzenwachstum ist abhängig von der Anzahl, dem Alter und der räumlichen Verteilung der Pflanzen. Während jedes Zeitschritts wächst, reproduziert sich oder stirbt die Pflanze.

Der Einfluss der einzelnen Pflanze auf ihren Nachbarn wird jetzt in einer phänomenologischen Weise beschrieben und unterteilt in symmetrische und asymmetrische Konkurrenz [96].

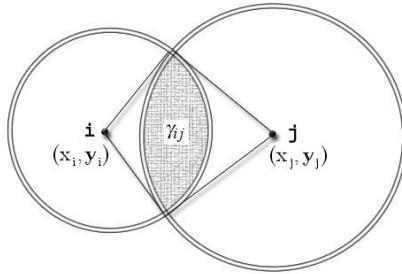


Abbildung 4.2: Die Geometrie der räumlichen Konkurrenz zwischen den Pflanzen i und j mit Positionen (x_i, y_i) und (x_j, y_j) ist eine Funktion des Überlappungsbereichs γ_{ij} .

4.2.1 Symmetrische Konkurrenz σ_{ij}

Symmetrische Konkurrenz ist eine doppelseitige Interaktion, in der die Nährstoffe im Überlappungsbereich gleichmäßig zwischen den Konkurrenten aufgeteilt werden. Die Einzelpflanzen konkurrieren gemeinsam um ähnliche Nährstoffe.

$$\sigma_{ij} = \frac{\gamma_{ij}}{2}. \quad (4.2)$$

Hier sind i und j die Pflanzen, und γ_{ij} ist der Überlappungsbereich zwischen der Pflanze i und der Pflanze j (siehe Abbildung 4.2). In *Anhang A* wird beschrieben, wie die Größe des Überlappungsbereichs zwischen den Pflanzen i und j bestimmt wird.

In Gleichung (4.2) wird γ_{ij} durch 2 dividiert, damit jede konkurrierende Pflanze die Hälfte der Nährstoffe im Überlappungsbereich erhält. Die beiden konkurrierenden Pflanzen sind damit gleichermaßen vom Einfluss betroffen.

4.2.2 Asymmetrische Konkurrenz α_{ij}

In der asymmetrischen Konkurrenz findet eine einseitige Interaktion statt. Dies bedeutet: Wenn zwei Pflanzen sich überschneiden, erhält eine Pflanze alle Nährstoffe im Überlappungsbereich und die andere Pflanze erhält keine Nährstoffe, wie es beispielsweise bei der Konkurrenz um Licht der Fall ist [64].

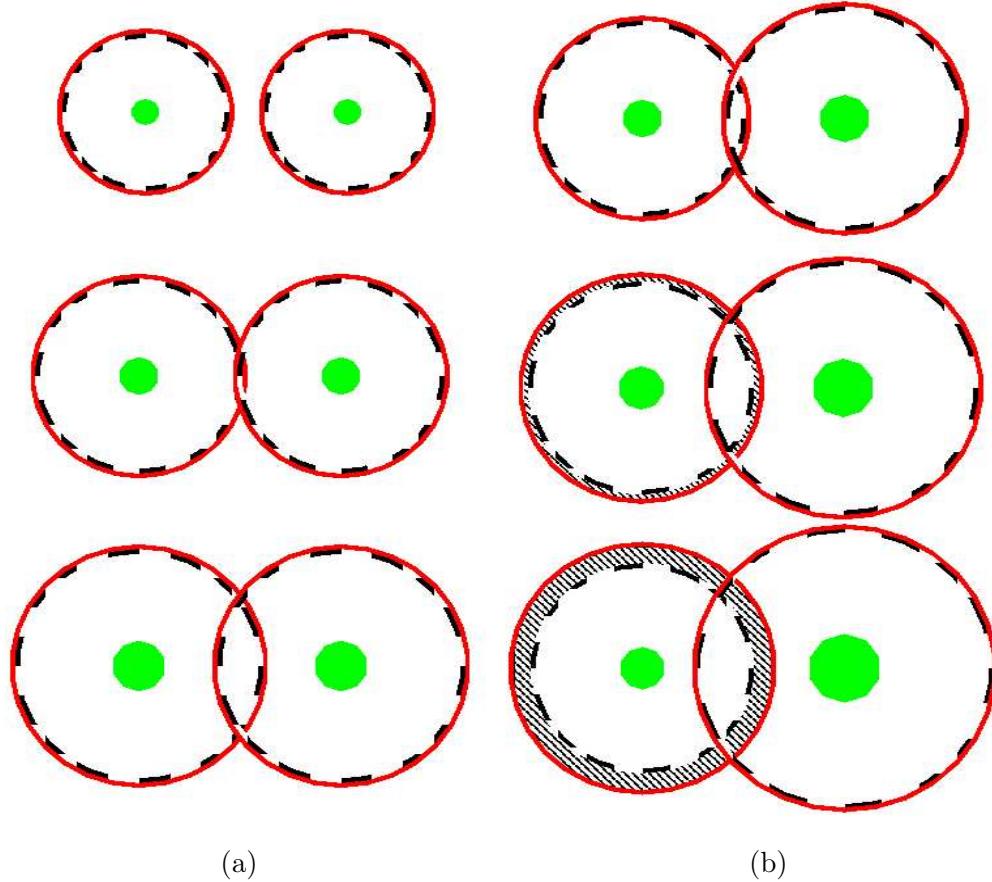


Abbildung 4.3: Unterschied zwischen symmetrischer und asymmetrischer Konkurrenz: a) Zwei Pflanzen der gleichen Größen verhalten sich in einer symmetrischen Weise: Beide nehmen die gleiche Menge von Nährstoffen/Licht und wachsen gleichmäßig; b) Wenn eine Pflanze kleiner ist, erhält sie weniger Nährstoffe/Licht, und der Effekt ist eine verringerte Wachstumsrate, die durch die gestrichelte schwarze Linie angezeigt wird.

$$\alpha_{ij} = \begin{cases} \gamma_{ij} & : f_i > f_j \\ \gamma_{ij} \text{ oder } 0 & : f_i = f_j \\ 0 & : f_i < f_j \end{cases} \quad (4.3)$$

Wobei f_i und f_j die Oberfläche von Kreis i und j sind. Gleichung (4.3) gibt an, dass die Pflanze mit dem größerem Radius alle Nährstoffe erhält. Deshalb sind nur die kleinen Pflanzen von der asymmetrischen Konkurrenz betroffen und nicht die jeweils größeren Pflanzen.

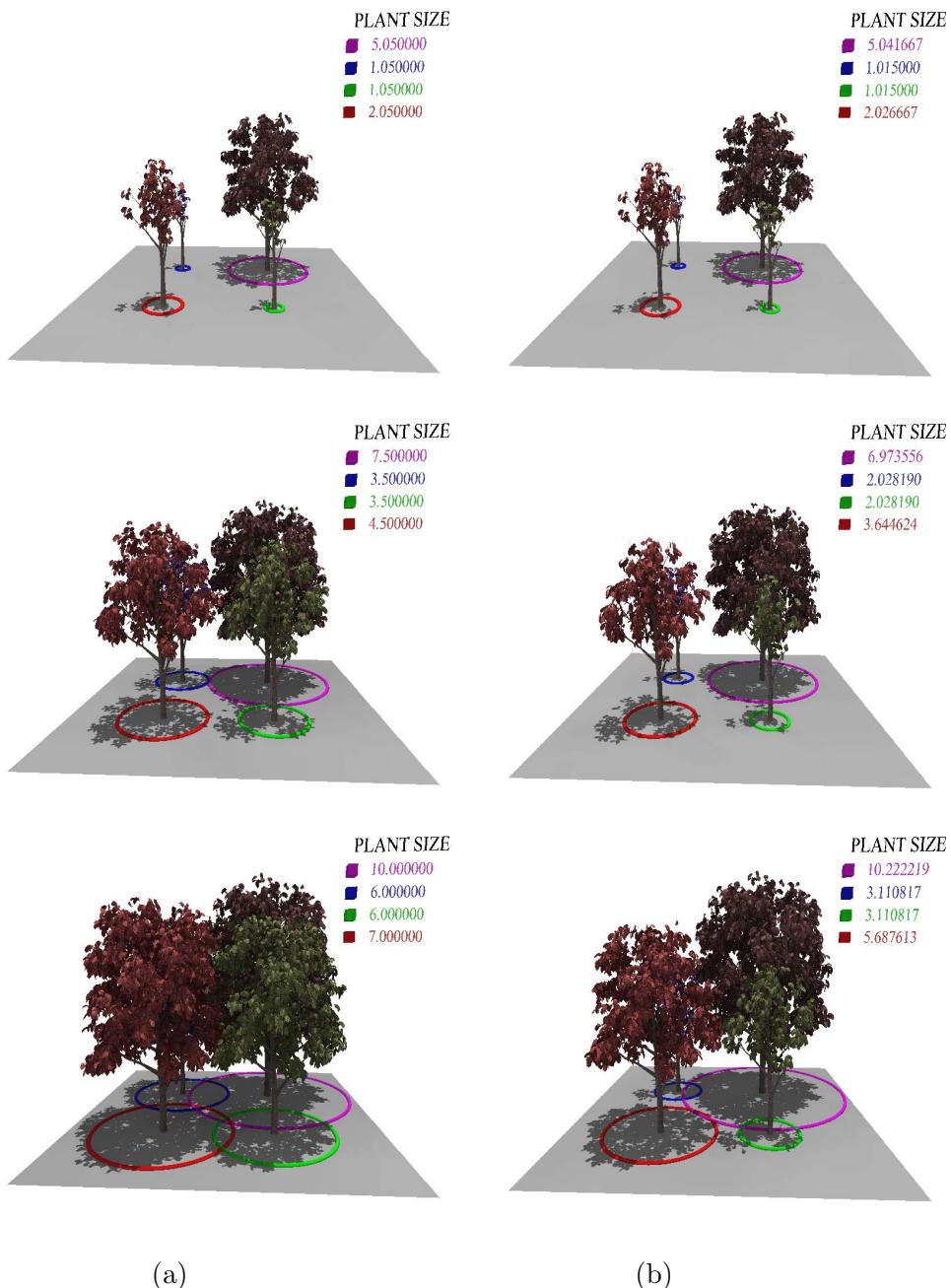


Abbildung 4.4: a) Ohne Konkurrenz. b) Mit symmetrischer und asymmetrischer Konkurrenz. Hier wird die kleine Pflanze von der größeren Pflanze dominiert.

4.2.3 Allgemeine Konkurrenz

Somit ergibt sich die allgemeine Formel für die Konkurrenz φ_i ein der gewichteten Summe von asymmetrischer α_{ij} und symmetrischer σ_{ij} Konkurrenz:

$$\varphi_i = p\alpha_{ij} + (1 - p)\sigma_{ij}. \quad (4.4)$$

Wobei $p \in [0..1]$ Anteil der asymmetrischen Konkurrenz ist, und $(1 - p)$ der Anteil der symmetrischen Konkurrenz. In Gleichung 4.4 wird zwischen drei Zuständen für die Stärke der symmetrischen und asymmetrischen Konkurrenz unterschieden. Wenn p kleiner als 0.5 ist, ist die asymmetrische Konkurrenz stärker als die symmetrische Konkurrenz. Wenn p gleich 0.5 ist, haben asymmetrische und symmetrische Konkurrenz einen ähnlichen Einfluss auf die Pflanzen. Ansonsten ist die symmetrische Konkurrenz stärker als die asymmetrische Konkurrenz.

In der Abbildung 4.3 werden drei Stufen für die asymmetrische und symmetrische Konkurrenz zwischen zwei Pflanzen dargestellt. Die linke Spalte zeigt den Unterschied zwischen nicht-vorhandener Konkurrenz und symmetrischer Konkurrenz. In der rechten Spalte wird die asymmetrische Interaktion im Gegensatz zum Wachstum ohne Konkurrenz gezeigt. In diesem Fall wächst eine Pflanze viel langsamer als die andere. In der Abbildung 4.4 wird das Wachstum einiger Bäume für beide Arten der Konkurrenz gezeigt. In der rechten Spalte werden die kleinen Pflanzen durch die größere Pflanze dominiert.

Das Wachstumsmodell kann in Verbindung mit einer symmetrischen und asymmetrischen Konkurrenz verwendet werden, um realistische Pflanzenpopulationen zu simulieren. Mit einer initialen Konfiguration ist es in diesem Verfahren möglich, realistische Größenunterschiede automatisch zu erzeugen, und auf das Sterben der Pflanzen zu reagieren.

4.3 Das Pflanzenwachstum

Das Wachstum der einzelnen Pflanze hängt von den benachbarten Pflanzen und von ihrer effektiven Größe ab. Es kann durch Richards Wachstumsmodell dargestellt werden [31, 46, 54]. Das Modell wird wie folgt geschrieben.

$$\frac{dv_i(t)}{dt} = \begin{cases} \frac{k}{1-\delta} f(v_i(t), a) & ((\frac{1}{w_m} \sum_{j=1}^n v_j(t) \varphi_i)^{\delta-1} - 1) \\ & \delta \neq 1 \\ kf(v_i(t), a) & (\log(w_m) - \log(\sum_{j=1}^n v_j(t) \varphi_i)) \\ & \delta = 1 \end{cases}$$

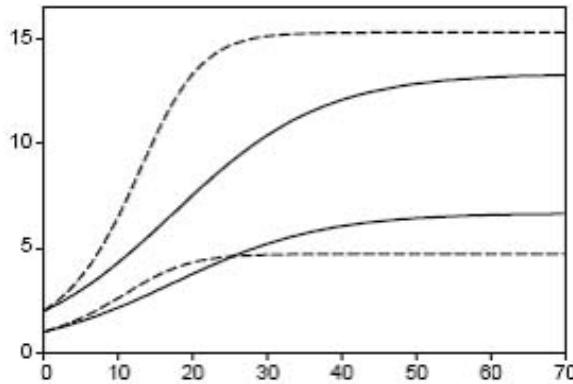


Abbildung 4.5: Richards Wachstumsmodell für zwei Pflanzen, die sich beeinflussen. Für zwei anfängliche Größen eins und zwei der beiden Pflanzen sind zwei Werte von Asymmetrie dargestellt. Volle Linie: $a = 1, w = 10, k = 0.1, \delta = 2$. Gestrichelte Linie: $a = 1, w = 10, k = 0.0667, \delta = 2$.

In dieser Gleichung ist w_m die maximale Größe der Pflanzenart, $v_i(t)$ ist die Größe der Pflanze i in Bezug auf die Zeit t , k ist ein Wachstumsparameter, $\frac{k}{1-\delta}$ ist die Wachstumsrate ohne Konkurrenz (siehe Abbildung 4.5 für typische Werte der Konstanten).

Die beiden Terme beschreiben die Abnahme des Wachstums der einzelnen Pflanze in Bezug auf die Größe und die Effekte der n aufeinander einwirkenden Pflanzen. Diese Terme, die für alle Pflanzen zur gegebenen Zeit wirken, verringern das Pflanzenwachstum.

Die Wirkung der asymmetrische Konkurrenz auf das Wachstum kann im Richards Wachstumsmodell mit eingeslossen werden, indem die Wachstumsfunktion der einzelnen Pflanzen entsprechend ihrer Größe modelliert wird:

$$f(v(t), a) = \begin{cases} 1 & : a = 0 \\ v(t)^a & : a > 0 \end{cases} \quad (4.5)$$

Hier stellt der Parameter a die Menge der Asymmetrie in den Größen der Pflanzen und damit auch die Neigung der Wachstumsfunktion fest [103, 17, 106, 18]. Der Wert ist zwischen 0 und ∞ . Der Grund für das Wählen einer Potenz-Funktion der Pflanzengröße in Gleichung 4.5 ist ihre biologische Relevanz sowie ihre Skalierungseigenschaften.

4.4 Reproduktion von Pflanzen

Im Modell reproduzieren sich die Pflanzen, indem sie ihre Samen zerstreuen. Die Pflanzen beginnen sich zu reproduzieren, sobald sie eine bestimmte Größe oder ein bestimmtes Alter erreicht haben. Die Samenproduktion steigt gleichzeitig mit der Pflanzengröße als lineare Funktion, bis die Pflanze ihre maximale Größe oder ihr maximales Alter erreicht hat. Die Samen werden im Umfeld um die Mutterpflanzen herum zerstreut. Für die Berechnung einer Samenposition verwendet man eine zweidimensionale Gaußsche Wahrscheinlichkeitsfunktion:

$$p(r) = e^{\frac{-r}{\lambda}}. \quad (4.6)$$

Hier ist λ der Hauptwert der Wahrscheinlichkeitsfunktion, und r ist der Verteilungsabstand.

4.5 Sterblichkeit von Pflanzen

Die Sterblichkeit der Pflanzen, die durch die Konkurrenz der Nachbarpflanzen beeinflusst werden, ist höher als die von anderen Pflanzen. Die Ursache dafür ist wieder der Mangel an Nährstoffen. Wir können die Sterblichkeitsgefahr als die durchschnittliche Pflanzengröße über die letzten n Schritte definieren [99]. In der Simulation werden tatsächliche und durchschnittliche Größe der einzelnen Pflanzen v_i in Bezug auf die Zeit t durch die folgenden Gleichungen definiert:

$$v_i(t+1) = v_i(t) + \frac{dv_i(t+1)}{dt}. \quad (4.7)$$

$$\bar{v}_i(t) = \frac{1}{n} \sum_{l=0}^n v_i(t-l). \quad (4.8)$$

Wir nehmen an, dass die Einzelpflanze stirbt, wenn die durchschnittliche Größe \bar{v}_i über die letzten n Zeitschritte unterhalb einer bestimmten Schwelle bleibt. Die Pflanzen sterben außerdem, sobald sie ihr maximales Alter erreichen.

4.6 Die Erweiterung der Konkurrenz

In dieser Erweiterung simulieren wir die Konkurrenz zwischen dem Samen der Seed-Banking Pflanzen und dem Samen der Nicht-Seed-Banking Pflanzen. Wie



Abbildung 4.6: Die unterschiedliche Dichte der Graufarbe, die die Menge der Nährstoffe im Boden und in der Umgebung der Pflanzen zeigt. Der Bereich *I* ist der Bereich mit den meisten Nährstoffen, dann folgen die Bereiche *III, II, IV, VI.*

bereits oben erwähnt, haben die Samen einer Seed-Banking Pflanze zwei Möglichkeiten zu keimen und zu wachsen. Wenn die Lebensbedingungen geeignet sind, beginnen sie sofort nach dem Auftreffen auf den Boden zu keimen. Wenn nicht, verbleiben sie ruhend, bis ihre Lebensbedingungen günstig sind. Dies vergrößert die Wahrscheinlichkeit des erfolgreichen Keimens und folglich ändert sich das Verhalten des Ökosystems drastisch. Die gegenwärtige jährliche Dichte einer Banker Population $B(t)$, einer Nicht-Seed-Banking Pflanzenpopulation $N(t)$ und die Menge des Samen $S(t)$, die auf unbestimmte Zeit ruhen, kann wie folgt beschrieben werden:

$$\begin{aligned} B(t+1) &= P[(1-\sigma)(1-\pi)b_B B(t) + \gamma(1-\pi)S(t)], \\ N(t+1) &= P(1-\pi)b_N N(t), \\ S(t+1) &= (1-\pi)(1-\gamma)S(t) + (1-\pi)\sigma b_B B(t). \end{aligned}$$

Hier sind b_B und b_N positive Konstanten, welche die Menge des Samens bezeichnen, der von Seed-Banking Pflanzen und Nicht-Seed-Banking Pflanzen produziert wird. Andere Parameter des Modells sind π : die jährliche Samensterblichkeit, γ : jährliche Samenkeimung, und σ : Samenzuordnung zur Seed-Banking Pflanzen. Die Wahrscheinlichkeit des Samenüberlebens P , welche von der Dichte der Pflanzenpopulation abhängig ist, wird nach der folgenden Gleichung berechnet [65]:

$$P = p * \exp(-v(1 - \pi)[b_N N(t) + (1 - \sigma)b_B B(t) + \gamma S(t)]). \quad (4.9)$$

Hier ist $p \in [0..1]$ die maximale Samenüberlebenrate. Der Parameter $v = 0.01$ ist ein Skalierungskoeffizient.

4.7 Simulation des Verfahrens

Das Modellieren der Konkurrenz ermöglicht es, biologisch plausible Verfahren zu simulieren, die auf externe Einflussfaktoren reagieren. Bevor ich das Verhalten der Simulation mit einer Reihe von Szenarios demonstriere, müssen die Anfangsbedingungen folgendermaßen gesetzt werden:

- Anzahl der neu produzierten Pflanzen durch die ausgewachsenen Pflanzen.
Diese Pflanzen werden zur Simulation hinzugefügt.
- Maximale Größe der Pflanze.
- Durchschnittliche Wachstumsrate der Pflanze.
- Menge der Nährstoffe im Boden. Sie wird in unterschiedlichen Graustufen dargestellt. Dies wird vom Benutzer gesteuert. Abbildung 4.6 zeigt eine einfache Illustration mit fünf Regionen unterschiedlicher Nährstoffsättigung.

Mit den Ergebnissen der Simulation können Animationen der Ökosystementwicklung produziert werden. Normalerweise werden die Pflanzen mit dem *Xfrog* Software-System modelliert [73], und dann in das System importiert. Zur Bilderzeugung werden die Pflanzenmodelle mit der *POVRAY* Raytracing-Software dargestellt.

Durch die Bedingungen, wie sie in der Abbildung 4.6 gegeben sind, unterscheiden sich die FON Radien der Pflanzen sehr in Bezug auf ihre Position. An den Positionen, an denen eine niedrige Menge von Nährstoffen vorhanden ist, sind die Radien viel größer als in anderen Positionen. Dies bedeutet, dass die Pflanzen in diesen Positionen viel früher um die notwendigen Nährstoffe konkurrieren. Im ersten Test werden 100 Pflanzen von der gleichen Art zufällig auf einem Bereich von $200m * 200m$ verteilt. Jede Pflanze wird wiederum durch zwei kreisförmige Bereiche dargestellt, wobei der Erste die Größe der Pflanze darstellt, und der Zweite den FON-Radius, der den erforderlichen Umgebungsraum der

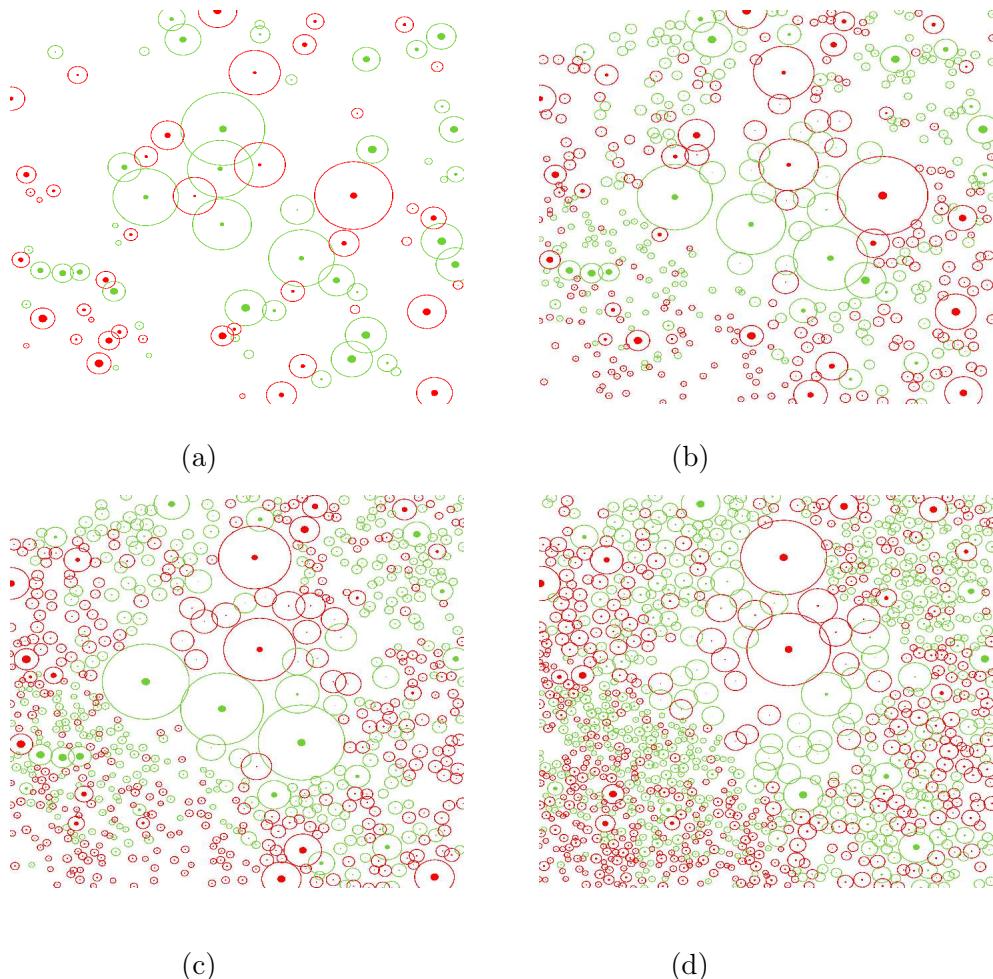


Abbildung 4.7: Entwicklung des Systems einer Pflanzenpopulation mit asymmetrischer Konkurrenz. Die hellen grünen Kreise präsentieren Pflanzen, die sehr alt sind. Die Pflanzen, die mit roten Kreisen gekennzeichnet sind, unterliegen einer starken Konkurrenz.

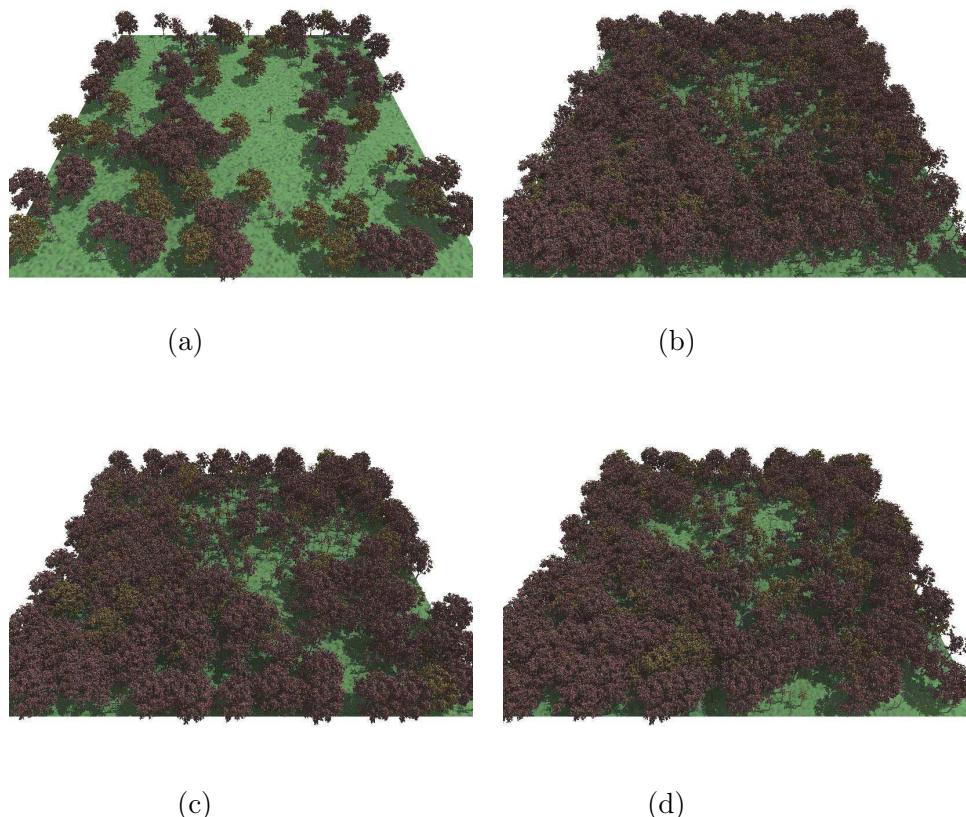


Abbildung 4.8: Das Rendering der Pflanzen in Abbildung 4.7. Man sieht, dass die Anzahl der Pflanzen, die im Mittelbereich positioniert wurden, geringer ist als in den anderen Bereichen. Der Grund dafür ist der vorhandene Nährstoffmangel.



Abbildung 4.9: Asymmetrische Konkurrenz zwischen zwei Pflanzensorten mit unterschiedlicher Größe. Der rote Kreis zeigt den Bereich an, in dem die zweite Art auf Grund der Konkurrenzbedingungen nicht wachsen kann.

Pflanze bezeichnet. Im System wird zusätzlich die Vitalität der Pflanze \bar{v} (entsprechend Gleichung. 4.8) und ihre Alter gespeichert. Die Abbildung 4.7 zeigt die Entwicklung einer Population unter Verwendung der Nährstoffverteilung, die in Abbildung 4.6 dargestellt ist.

Nachdem die Konkurrenz zwischen den gleichartigen Pflanzen simuliert und visualisiert wurde, erweitern wir das System, um so zwei verschiedene Arten von Pflanzen darzustellen. Die Pflanzen können während einer bestimmten Zeit wachsen, und neue Pflanzen produzieren. Zusätzlich wird in dieser Methode für jede Pflanze ihre Art sowie die Anzahl ihrer Samen definiert. In Abbildung 4.9 sehen wir, wie die kleineren Pflanzen durch die großen Pflanzen beeinflusst werden. Diejenigen von ihnen, die sich in der Nähe der größeren Art befinden, können nicht wachsen.

Schließlich sehen wir, wie eine Population reagiert, wenn eine Pflanze stirbt. In diesem Fall entwickeln sich die Pflanzennachbarn, die nicht mehr durch eine andere Pflanze dominiert werden, und somit wächst die Population gleichmäßig weiter (siehe Abbildung 4.11).

4.8 Zusammenfassung und Ergebnisse

In diesem Kapitel habe ich ein System für die Simulation und Visualisierung der Konkurrenz zwischen Pflanzen um Nährstoffe vorgestellt. Im Gegensatz zu den vorangehenden Arbeiten schließt dieses Verfahren die asymmetrische Pflanzenkonkurrenz ein. Der FON-Radius, der jeder Pflanze zugeordnet ist, wird von einer einzelnen Pflanze benötigt, um das Wachstum und die Entwicklung der Pflanze während der Konkurrenz zu berechnen. Das Verfahren wurde in einer Anzahl von Szenen getestet, in denen die Konkurrenz innerhalb einer Art und

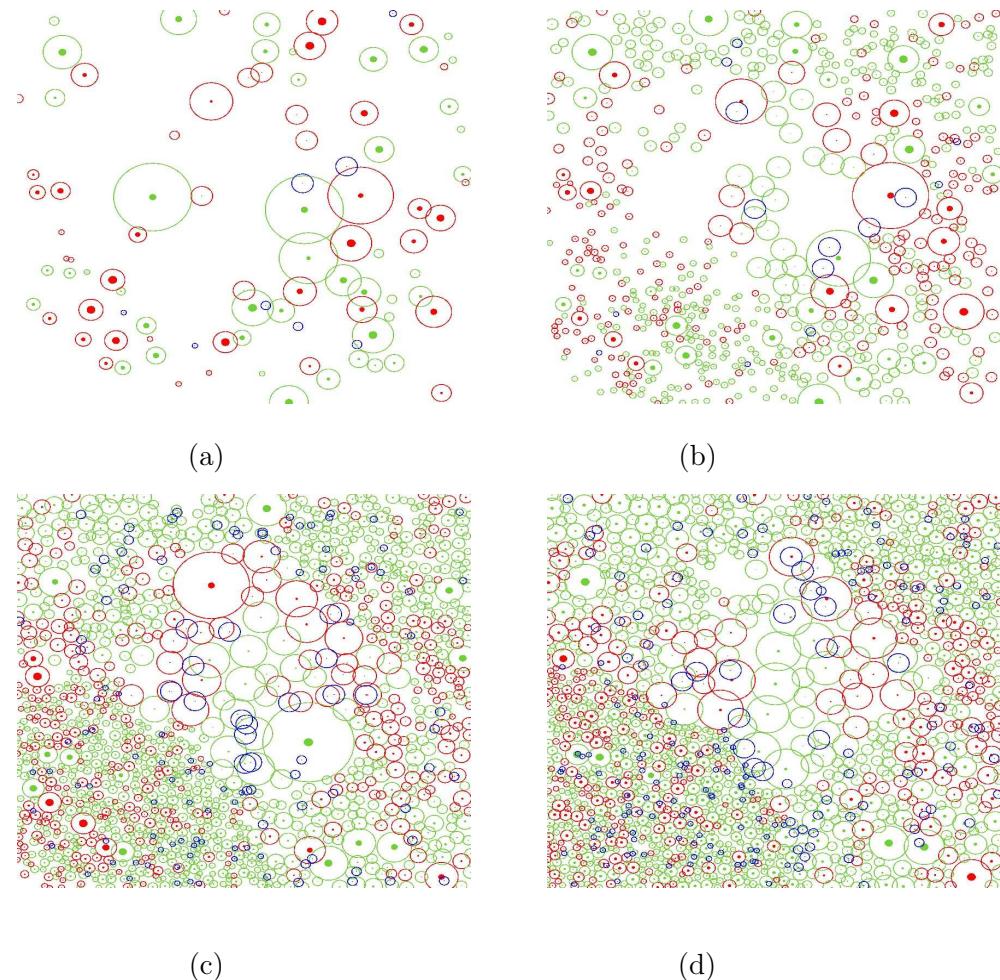


Abbildung 4.10: Entwicklung des Systems einer Seed-Banking Pflanzenpopulation mit gemischter symmetrischen/asymmetrischen Konkurrenz.

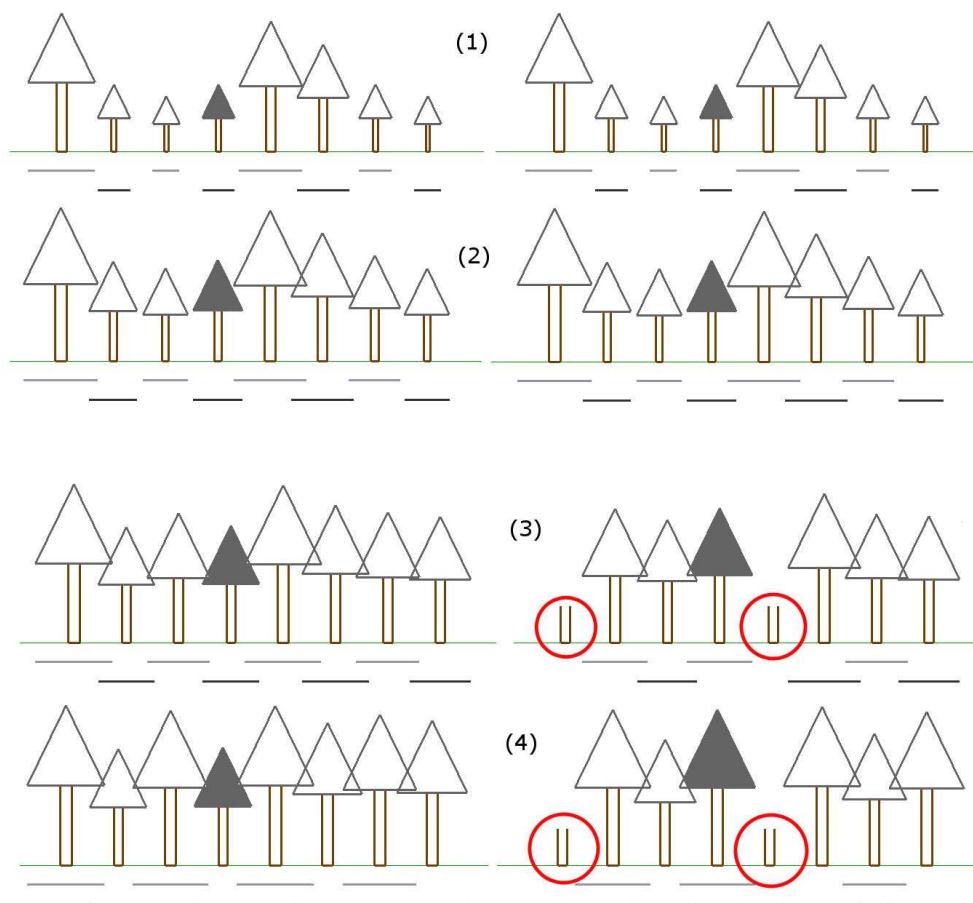


Abbildung 4.11: Die Reaktion einer Population auf das Absterben von Einzelpflanzen in vier Simulationsschritten. In dritten Systemschritt sterben zwei Einzelpflanzen und das System ändert allmählich seine Form.

zwischen unterschiedlichen Pflanzenarten simuliert wird. Mit der Anwendung dieser Art von Simulation können Animationen von Ökosystementwicklungen mit einem hohen Grad von Genauigkeit reproduziert werden.

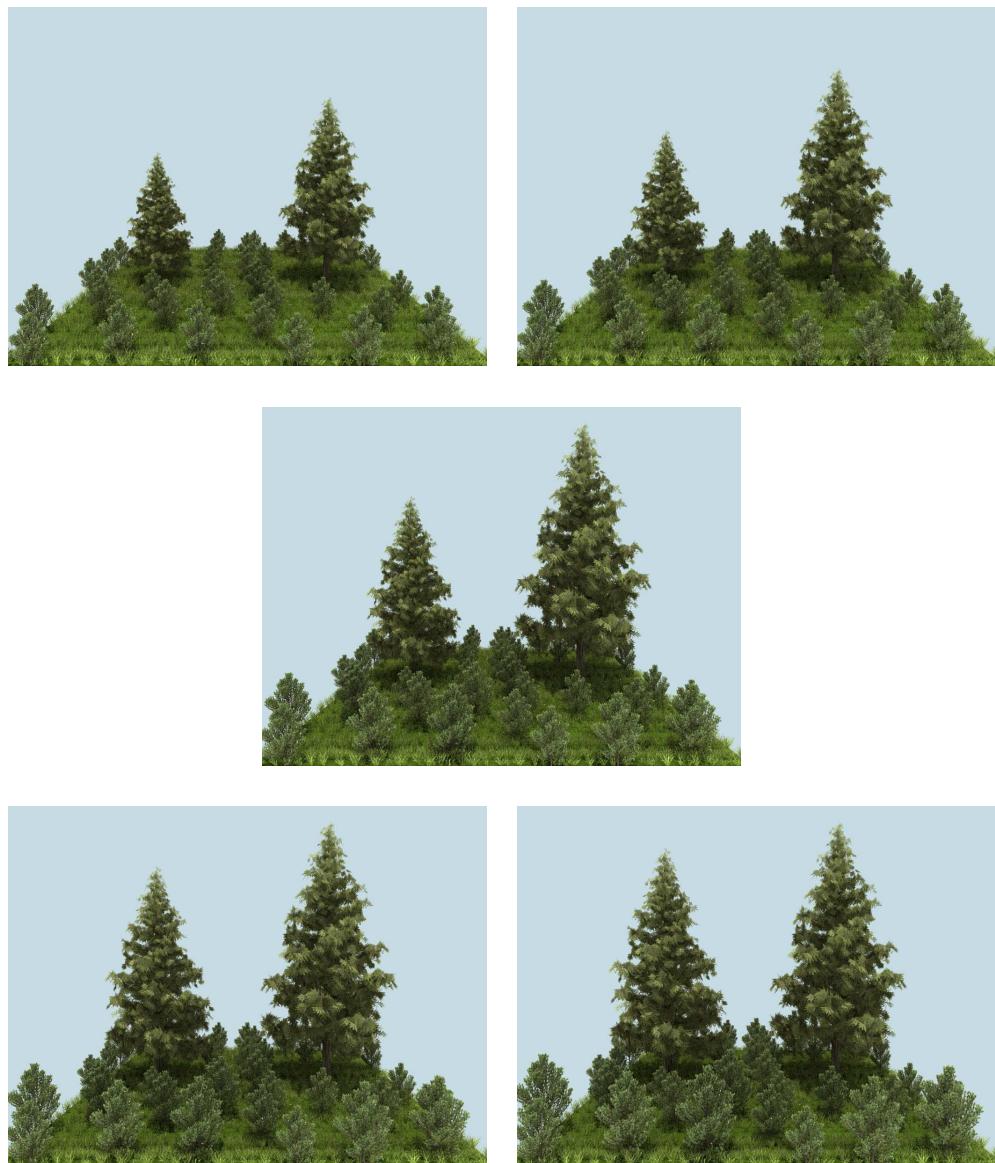


Abbildung 4.12: Die Entwicklung einer Pflanzenpopulation.

Kapitel 5

Unterschiedliche Konkurrenzarten

In diesem Kapitel stelle ich eine neue Methode zur Visualisierung und Simulation des Wachstums und der Entwicklung von Pflanzen unter Einbeziehung der Konkurrenz der Pflanzen um Nährstoffe vor. Im Gegensatz zum vorangehenden Kapitel wird die Pflanzenkonkurrenz um Nährstoffe nun als Untergrundkonkurrenz und Obergrundkonkurrenz (symmetrische und asymmetrische Konkurrenz) dargestellt.

Die Stärke der Untergrundkonkurrenz ist abhängig von der Wurzelbiomasse der Nachbarpflanzen, wogegen die Stärke der Obergrundkonkurrenz von der Nachbarkörperbiomasse abhängig ist. Der Einfluss der Untergrundkonkurrenz auf die Pflanzen ist typischerweise größer als der Einfluss der Obergrundkonkurrenz. Ich stelle eine einfache und leistungsfähige Simulationsmethode für diese Konkurrenzarten zur Verfügung, die in eine symmetrische und asymmetrische Konkurrenz aufgegliedert ist. Hierbei wird die Obergrundkonkurrenz nicht grundsätzlich als asymmetrische Konkurrenz betrachtet, sondern als eine symmetrische Konkurrenz am Rand des Einflussbereichs der jeweiligen Pflanzen. Jede Pflanze beeinflusst ihre Nachbarn somit auf neun verschiedene Arten.

5.1 Motivation

Ein wichtiger Teil in der Entwicklung der Simulation großer Pflanzengruppen ist die Einbeziehung der Konkurrenz der Pflanzen um Licht und um Nährstoffe. In einer vorherigen Arbeit [13] wurde eine Methode für die Modellierung und die Echtzeitdarstellung großer Pflanzengruppen vorgestellt. Ich stelle eine

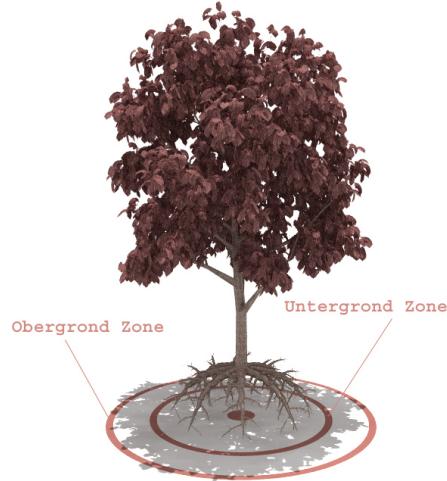


Abbildung 5.1: Das FON Modell für die Untergrund- und Obergrund-Zone.

Erweiterung dieser Methode vor, die auf die unterschiedliche Stärke des Untergrundeinflusses und des Obergrundeinflusses der jeweiligen Pflanzen fokussiert.

Lane und Prusinkiewicz unterscheiden in [13] zwischen vier Zuständen der Pflanzenkonkurrenz: (i) Die einzelne Pflanze hat keinen Einfluss auf ihre Nachbarn. (ii) Die Pflanze hat einen positiven Einfluss auf ihre Nachbarn. (iii) Die Pflanze hat einen negativen Einfluss auf ihre Nachbarn. (iv) Die Pflanze hat kurzfristig einen negativen Einfluss und langfristig einen positiven Einfluss auf ihre Nachbarn. In meiner Arbeit habe ich diese vier Zustände zu neun Zuständen erweitert [30]. Dabei unterscheide ich zwischen Zuständen im Untergrund und Zuständen im Obergrund. Dem Untergrundeinfluss werden drei Zustände zugerechnet, während dem Obergrundeinfluss gleichzeitig drei weitere Zustände zugerechnet werden. Das heißt, das die Pflanze einen negativen Einfluss im Untergrund und negativen Einfluss im Obergrund auf ihre Nachbarn ausübt, oder umgekehrt einen negativen Einfluss im Untergrund und einen positiven Einfluss im Obergrund ausübt, usw.

Um diese Arbeit zu implementieren, wird die Beschreibung von Pflanzenpopulationen aus [99] und [98] verwendet. Diese Form der Beschreibung beinhaltet Informationen über den Zustand der Einzelpflanze sowie Art, Größe, Alter und Ort der Pflanze.

5.2 Untergrund- und Obergrundkonkurrenz

Die Untergrundkonkurrenz und die Obergrundkonkurrenz sind für alle Pflanzenpopulationen, die in der Vegetationswissenschaft untersucht werden, unterschiedlich. Jede Pflanze hat zwei Einflussbereiche (Abbildung 5.1). Der erste Bereich ist für Untergrundkonkurrenz, und der zweite steht für die Obergrundkonkurrenz. Ich verwende hier wieder das FON (Field-Of-Neighbourhood) Modell, um eine Pflanze darzustellen (siehe dazu Abschnitt 4.2). Bei der Gestaltung der beiden Bereiche wird die Menge der Nährstoffe für den Untergrundbereich und die Menge des Lichts für den Obergrundbereich berücksichtigt. Um den Einflussbereich festzulegen, wird eine nicht-lineare Funktion des basalen Radius verwendet (siehe dazu Gleichung 4.1). In der Gleichung 4.1 sind a und b Konstante und hängen von der Dichte des Nährstoffs im Untergrundbereich und von der Dichte des Lichts im Obergrundbereich ab. Wenn der Untergrund fruchtbar ist, sind a und b klein. In diesem Fall wird der Untergrundbereich klein sein. Im gegensätzlichen Fall sind a und b groß und somit auch der Untergrundbereich, den die Pflanze zum Aufsammeln der Nährstoffe benötigt. Normalerweise ist $a \in [10..100]$ und $b \in [1..3]$.

5.2.1 Untergrundkonkurrenz

Eine Untergrundkonkurrenz entsteht, wenn eine Pflanze das Wachstum, das Überleben oder die Fruchtbarkeit der benachbarten Pflanzen verringert, indem sie die verfügbaren Nährstoffe durch ihren Eigenbedarf verringert. Die Untergrundkonkurrenz kann stärker als die Obergrundkonkurrenz sein und viele benachbarte Pflanzen im Obergrund beeinflussen. Die Konkurrenz im Untergrund ist eine symmetrische Konkurrenz. Sie verringert sich mit der Zunahme des Nährstoffniveaus im Untergrundbereich. Die Einflussstärke der benachbarten Pflanzen auf eine Pflanze im Untergrundbereich wird durch die folgende Gleichung ermittelt [64]:

$$\sigma_i = \frac{\sum_{j=1}^n \gamma_{ij}}{2 * A_i} \quad (5.1)$$

Hier sind i und j Pflanzen, γ_{ij} ist die Größe des Überlappungsbereichs zwischen den Pflanzen i und j , n ist die Anzahl der Pflanzen, die mit der Pflanze i überlappen, A_i ist die Größe der Pflanze i .

In Abbildung 5.2 wird die symmetrische Konkurrenz zwischen den Pflanzen simuliert. In der Spalte (a) sind drei Stufen des Pflanzenwachstums mit sym-

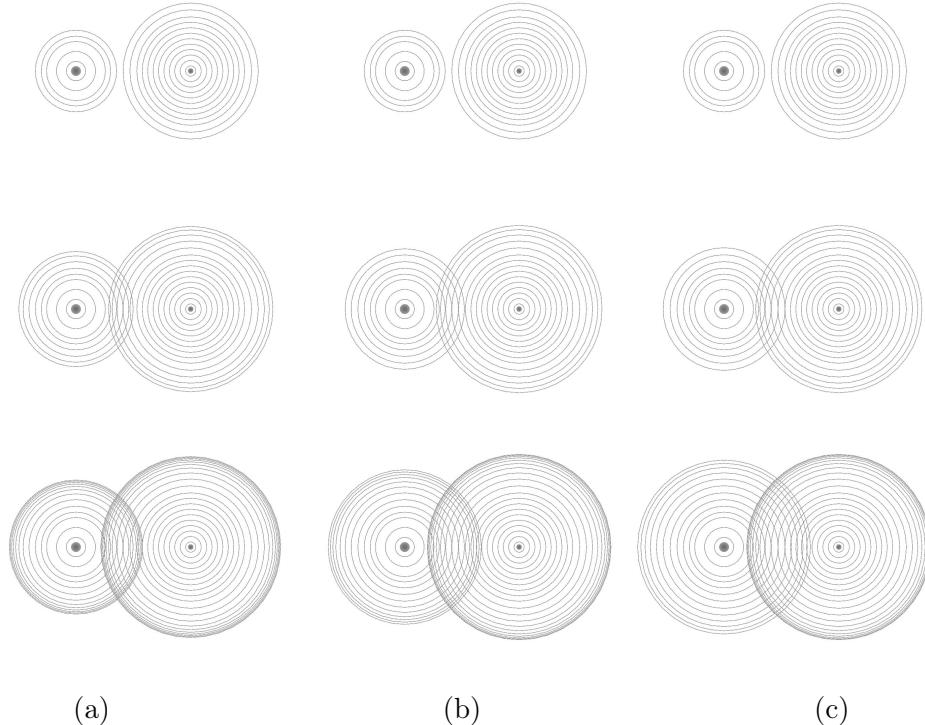


Abbildung 5.2: Unterschied zwischen symmetrischer und asymmetrischer Konkurrenz sowie ohne Konkurrenz. (a) symmetrische Konkurrenz; b) asymmetrische Konkurrenz; c) ohne Konkurrenz.

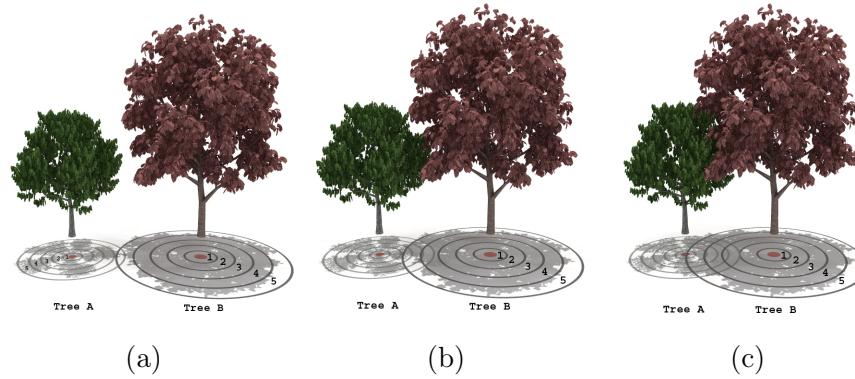


Abbildung 5.3: Drei Stufen illustrieren die Intensität und Art der Konkurrenz um das Licht. (a) Die Konkurrenz ist symmetrisch, weil die Überlappung im Bereich 5 liegt. (b) Die Konkurrenz ist ebenfalls symmetrisch, weil die Überlappung in den Bereichen 5 und 4 Liegt. (c) Die Konkurrenz ist symmetrisch in den Bereichen 5 und 4 und asymmetrisch in anderen Bereichen.



Abbildung 5.4: Der Obergrumbereich wurde in fünf Bereiche geteilt, damit unterschieden werden kann, in welchem Bereich die Konkurrenz asymmetrisch ist, und in welchem sie symmetrisch ist. In 4 und 5 ist die Konkurrenz symmetrisch, wohingegen sie in 1, 2 und 3 asymmetrisch ist.

metrischer Konkurrenz dargestellt. Im Gegensatz dazu sind in Spalte (c) vier Stufen des Pflanzenwachstums ohne Konkurrenz dargestellt. Aus dem Vergleich im Spalten (a) und (c) können wir erkennen, dass die Pflanzen in der Spalte (a) weniger wachsen als die Pflanzen in der Spalte (c).

5.2.2 Obergrundkonkurrenz

Wenn Pflanzen um Licht konkurrieren, erhalten größere Pflanzen häufig den Hauptanteil des Lichts im Überlappungsbereich der symmetrischen und asymmetrischen Konkurrenz. In [40] und [104] wird die Konkurrenz um das Licht daher als asymmetrische Konkurrenz betrachtet.

In der vorliegenden Arbeit wurde der Obergrumbereich in fünf Bereiche geteilt, um die Obergrundkonkurrenz zu bestimmen (siehe Abbildung 5.4). Die Obergrundkonkurrenz wird als asymmetrisch in den Bereichen 1 – 3 und als symmetrisch in den Bereichen 4 und 5 betrachtet (Abbildung 5.3), weil die Bewegung der Sonne um die Pflanze herum Änderungen am Schattenort verursacht (siehe Abbildung 5.5). Von der Abbildung 5.6, die das Ineinanderverschmelzen der Schatten (Abbildung 5.5) zeigt, ist ersichtlich, dass der Schatten innerhalb des roten Kreises am intensivsten ist. Hier ist die Lichtkonkurrenz stärker und

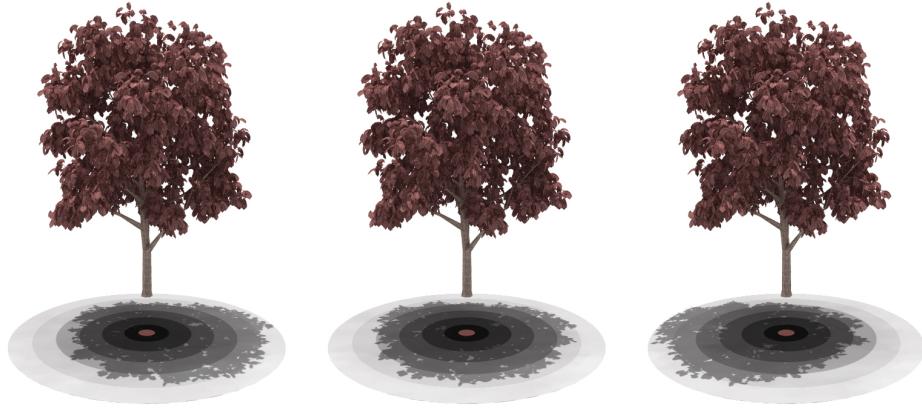


Abbildung 5.5: Drei Stufen illustrieren, wie die Sonne um den Baum herum läuft, und welche Bereiche während der gesamten Zeit im Schatten liegen.

deshalb kann die kleine Pflanze das Licht von ihren großen Nachbarpflanzen in den Bereichen 4 und 5 erhalten.

Für diese Situation, wenn also die Überlappung im Bereich 4 oder 5 liegt, wird die Obergrundkonkurrenz α_i aus [107] mit der folgenden Gleichungen berechnet:

$$\beta_{ij} = \begin{cases} \gamma_{ij} & : A_i < A_j \\ \gamma_{ij} \text{ or } 0 & : A_i = A_j \\ 0 & : A_i > A_j \end{cases} \quad (5.2)$$

$$\alpha_i = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{3\beta_{ij}}{F(i,j)}}{A_i} \quad (5.3)$$

A_i und A_j sind die Größe der Kreise i und j , γ_{ij} ist die Größe des Überlappungsbereichs zwischen der Pflanze i und der Pflanze j . $F(i,j)$ ist der Bereichsindex der Überschneidung von Baum i mit dem Baum j . Beispielsweise sieht man in Abbildung 5.3(a), dass sich der Schatten von Baum A mit dem Schatten von Baum B im Bereich 5 überschneidet. In Abbildung 5.3(b) überschneidet sich der Schatten von Baum A mit dem Schatten von Baum B im Bereich 4 und in Abbildung 5.3(c) überschneidet sich der Schatten von Baum A mit dem Schatten von Baum B in Bereich 3.

Für die symmetrische Konkurrenz, wenn die Überlappung im Bereich 1-3 liegt, dann wird α_i in der folgenden Gleichung bestimmt:

$$\alpha_i = \frac{\sum_{j=1}^n \beta_{ij}}{A_i} \quad (5.4)$$

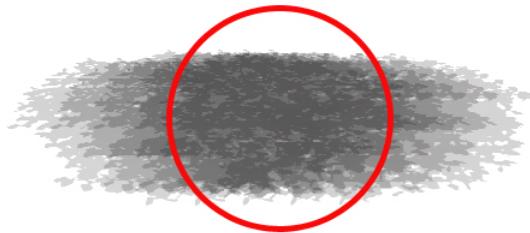


Abbildung 5.6: Dieses Bild zeigt die Intensität des Schattens. Innerhalb des roten Kreises (Kernschatten) ist die Intensität am stärksten.

Von Abbildung 5.2 ist ersichtlich, dass, wenn das Wachstum der Pflanzen in der Spalte (a) mit den Pflanzen in Spalte (b) verglichen, kann logisch abgeleitet werden, dass die Pflanzen in Spalte (a) enger zusammen wachsen werden als die Pflanzen in Spalte (b). Der Hauptgrund für dieses Ergebnis ist, dass hier die Untergrundkonkurrenz die Pflanzen stärker beeinflusst als die Obergrundkonkurrenz. Die allgemeine Konkurrenz zwischen den Pflanzen wird in der folgenden Gleichung festgestellt:

$$\varphi_i = p\alpha_i + (1 - p)\sigma_i \quad (5.5)$$

Wobei φ_i die allgemeine Konkurrenz beschreibt, welche die i Pflanze von ihren Nachbarpflanzen erhält. $p \in [0, 1]$ ist der Anteil der Obergrundkonkurrenz der allgemeinen Konkurrenz.

5.3 Konkurrenzarten

Unterschiedliche Pflanzenarten haben unterschiedlichen Strategien, um den für sie notwendigen Anteil an Nährstoffen zu erhalten [78]. Im Gegensatz zu den meisten Pflanzen gibt es einige, die nicht um die gleichen Nährstoffe konkurrieren und sich auch deshalb nicht gegenseitig beeinflussen. In einigen Fällen ist die Interaktion zwischen zwei Arten nützlich für eine Art, aber hat keine Wirkung

auf die andere. Um die Art des Untergrundeinflusses und des Obergrundeinflusses zu verfeinern, wird die Gleichung (5.5) zur folgenden Gleichung modifiziert, indem zusätzliche Faktoren s_1, s_2 eingeführt werden, die auch positive Einflüsse beschreiben.

$$\varphi_i = (s_1)p\alpha_i + (s_2)(1-p)\sigma_i \quad (5.6)$$

$s_1 \in \{-1, 0, 1\}$ legt die Art des Obergrundeinflusses fest, $s_2 \in \{-1, 0, 1\}$ die Art des Untergrundeinflusses. In Gleichung (5.6) wird die Pflanze durch Nachbarpflanzen im Obergrund negativ beeinflusst, wenn $s_1 = 1$ ist, oder positiv, wenn $s_1 = -1$ ist. In der (Tabelle 5.1) wird gezeigt, dass jede Pflanze von neun Arten des Einflusses betroffen sein kann.

	N	T	P
N	NN	NT	NP
T	TN	TT	TP
P	PN	PT	PP

Tabelle 5.1: Art des Einflusses benachbarter Pflanzen: N steht für den negativen Einfluss, T für den neutralen Einfluss, und P repräsentiert den positiven Einfluss. Die erste Zeile illustriert die Art des Obergrundeinflusses, und die erste Spalte stellt die Art des Untergrundeinflusses dar.

Um den Konkurrenzfaktor C zu definieren, wird der Konkurrenzterm φ_i verwendet. C stellt fest, in welchem Maße das Wachstum der Einzelpflanze durch die Konkurrenz verringert wird. Wenn kein Einfluss festzustellen ist, ist $\varphi_i = 0$ und $C = 1$, was bedeutet, dass die Pflanzen wachsen ohne von Konkurrenz betroffen zu sein.

$$C = \begin{cases} 1 - 2\varphi_i & : \varphi_i \leq 0.5 \\ 0 & : \varphi_i > 0.5 \end{cases} \quad (5.7)$$

Ist jedoch $\varphi_i > 0.5$, so stellt die Pflanze das Wachtum ein.

5.4 Wachstumsmodelle

Das Wachstum der einzelnen Pflanze ist von ihrer effektiven Größe, ihrer maximalen Größe und ihrer maximalen Wachstumsrate abhängig. Die mögliche

Wachstumsrate der einzelnen Pflanze GR wird in der folgenden Gleichung definiert:

$$GR = \frac{MGR * R_{Basal}}{R_{Max}} \left(1 - \frac{R_{Basal}}{R_{Max}}\right) \quad (5.8)$$

MGR ist die höchste Wachstumsrate der Pflanze. R_{Max} ist die maximale Größe der Pflanze. R_{Basal} ist der effektive Radius des Pflanzenstammes. Um die Wachstumsrate unter Konkurrenz zu definieren, wird GR mit C aus Gleichung (5.7) multipliziert.

$$\Delta R_{Basal} = GR * C \quad (5.9)$$

5.5 Implementierung

Die Anwendung von Obergrund und Untergrundkonkurrenz erzeugt bei der Wachstumssimulation ein biologisch plausibles System. Um die Konkurrenz zwischen Pflanzen darstellen zu können, habe ich als erstes ein diskretes System für zwei Pflanzenarten implementiert. Dieses System wird durch folgende Daten repräsentiert:

- A. Die Anzahl jeder Pflanzenart.
- B. Die maximale Größe jeder Pflanzenart.
- C. Die durchschnittliche Wachstumsrate jeder Pflanzenart pro Zeitschritt.
- D. Die Einflussart unterschiedlicher Pflanzen im Untergrund und im Obergrund.
- E. Die Menge der Nährstoffe im Untergrund und die Intensität des Lichts im Obergrund werden vorgegeben.

Im Xfrog Software System [73] werden die Pflanzen für ihre Verwendung im System modelliert. Danach werden Sie ins System als POVRAY MESH2 importiert. Ich demonstriere die Ergebnisse in einem Film, der die Entwicklung der Pflanzengesellschaft zeigt.

Für die Simulation wurden auf einen $60m * 60m$ Bereich ein Baum, 155 Büsche, 4000 Wiesenpflanzen und 200 Blütenpflanzen zufällig verteilt. Jede Pflanze wird in drei Kreisen dargestellt, wobei der erste Kreis die Größe der Pflanze darstellt,

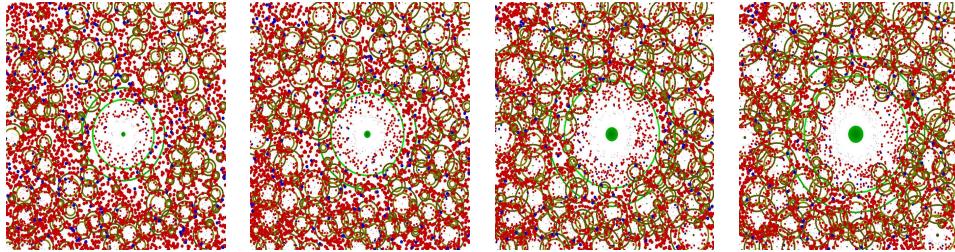


Abbildung 5.7: Simulationsschritte eines Ökosystems, das aus fünf Pflanzenarten besteht. Obergrund- und Untergrundkonkurrenz wird durchgeführt. Die Farben zeigen die verschiedenen Pflanzenarten an. Jede Pflanze hat hier zwei Kreise, die zwei Einflussbereiche zeigen.

der zweite Kreis die Größe des Obergrunbalkens, der von Intensität des Lichts abhängt. Der dritte Kreis stellt die Größe des Untergrunbalkens dar, der von der Menge der Nährstoffe abhängt. Die Nährstoffmenge in einer Position wird durch die Intensität des Grauwerts in Abbildung 4.6 bestimmt. Man sieht, dass Bereich I der am besten mit Nährstoffen versorgte Bereich ist, und Bereich VI der am schlechtesten mit Nährstoffen versorgte.

Für die Simulation werden Pflanzen verwendet, die einen negativen Einfluss auf andere Pflanzen sowohl im Übergrund- als auch im Untergrunbalken haben. Das bedeutet, dass in Gl. (5.6) $s_1 = 1$ und $s_2 = 1$ für jede Pflanze ist.

Abbildung 5.7 zeigt vier Stufen unserer Simulation. Die grünen Pflanzen stellen die größeren Arten dar, und die braunen Pflanzen die kleineren Arten. Die roten Kreise symbolisieren die Wiesenpflanzen, und die blauen Kreise die Blütenpflanzen. Aus Abbildung 5.7 (a) und (b) kann abgeleitet werden, dass die braunen Pflanzen, die nahe an den grünen Pflanzen stehen, weniger dicht und langsamer als die anderen braunen Pflanzen wachsen. Die Ursache dafür ist, dass die braunen Pflanzen unter der starken Untergrundkonkurrenz der grünen Pflanzen leiden. Zusätzlich ist aus der Darstellung ersichtlich, dass sich in der letzten Stufe die Anzahl der braunen Kreise verringert, wenn die vorhandenen Nährstoffe und das Licht durch die großen Pflanzen absorbiert werden.

5.6 Ergebnisse

In der vorliegenden Arbeit wurde das *FON* Modell verwendet, um eine Pflanze darzustellen. Für jede Pflanze wurde die Obergrundkonkurrenz und Untergrundkonkurrenz festgelegt. Bei der Berechnung der allgemeinen Konkurrenz wurden verschiedene Arten von Konkurrenzeinflüssen berücksichtigt. In Abbildung 5.8

und 5.9 werden vier getrennte Stadien dargestellt, in welchen die Entwicklung eines weiteren Systems für unterschiedliche Arten der Untergrund und Obergrundkonkurrenz gezeigt sind. In Abbildung (5.8) haben die Bäume einen negativen Einfluss auf andere Pflanzen im Obergrund, aber keinen Einfluss auf die Pflanzen im Untergrund. Die Wiese und die Blumen haben keinen Einfluss auf die Bäume und andere Arten, weder im Untergrund noch im Obergrund. Die großen Wiesenpflanzen haben einen negativen Einfluss auf die kleinen Wiesenpflanzen und auf die Blumen im Untergrund, und haben ebenfalls keinen Einfluss im Obergrund. Man kann sehen, dass die großen Wiesen eine Gruppierung bilden, und dass die kleineren Pflanzen und Blumen innerhalb dieser Gruppe absterben.

Die Anwendung der Methode wird in einem Film veranschaulicht. Hier wird die Bewegung des Schattens um die Pflanze simuliert, und dann wird die Konkurrenz zwischen Pflanzen ausgegeben. Der Film ist auf beiliegenden CD abgespeichert.



Abbildung 5.8: Resultierende Bilder der Simulation der Ökosystems aus Abbildung. 5.7.

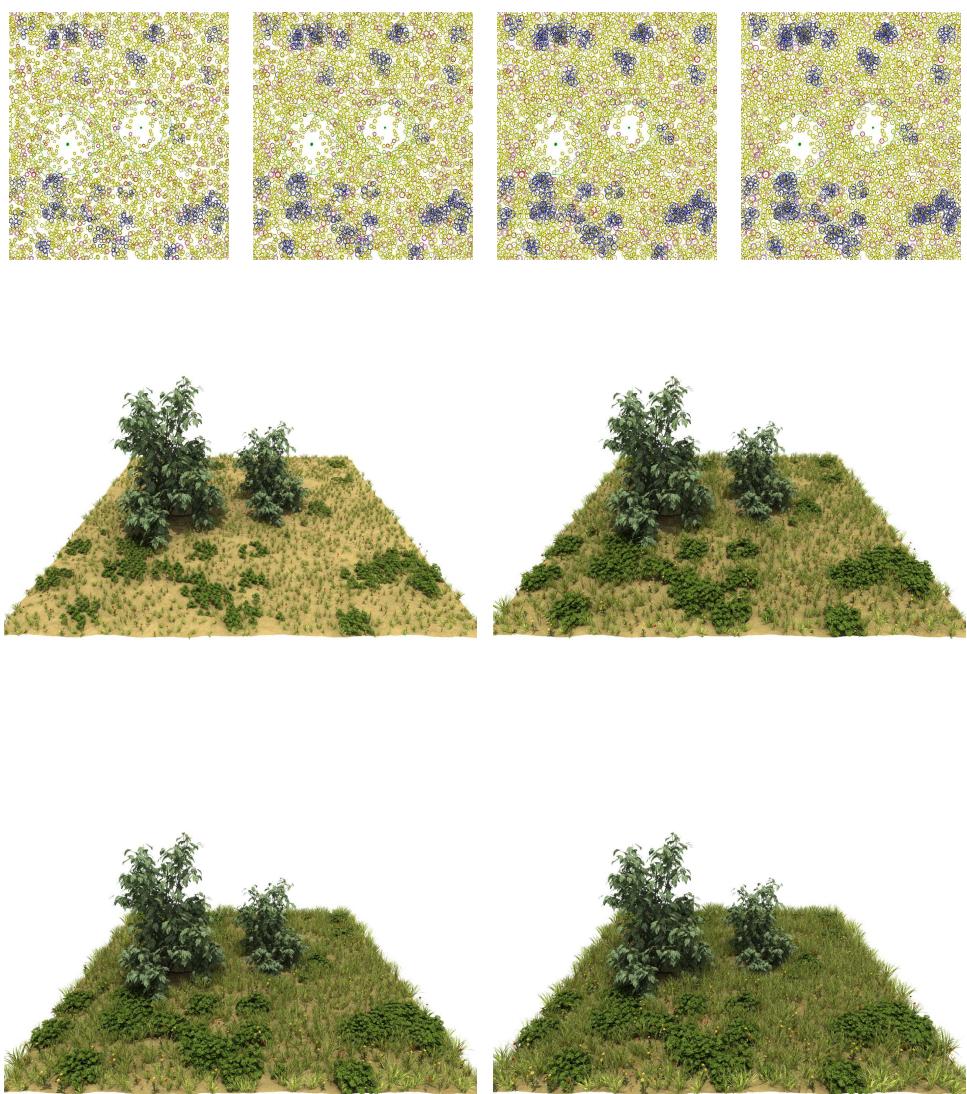


Abbildung 5.9: Vier Darstellungen einer komplexen Simulation.

Kapitel 6

Kachelbasierte Pflanzenverteilung

In den verwandten Arbeiten wurden bereits kachelbasierte Methoden zur nicht-periodischen Parkettierung von Flächen vorgestellt. Diese Methoden erlauben es, mit begrenztem Aufwand an Positions- und Wachstumsdaten große Flächen effizient zu füllen, ohne das sichtbare Wiederholungsartefakt entstehen. In diesem Kapitel stelle ich ein Verfahren vor, um solche Wang-Kacheln mit 2D-Verteilungen oder auch 3D-Geometrien zu füllen, indem die bereits beschriebene FON-Simulationsmethode auf die Kacheln angewendet wird. Dies erlaubt es, die Menge der zu berechnenden Pflanzen und Pflanzenpositionen zu minimieren. Hierzu werden spezielle Kachelmengen verwendet, die es erlauben, die durch den Simulationsalgorithmus erzeugten verschiedenen Verteilungsdichten darzustellen. Da hierbei an den Kachelrändern Fehler auftreten können, werden durch eine Verfeinerung der Darstellung weiche Dichteübergänge an kritischen Stellen geschaffen. Diese Art der Modellierung erlaubt besonders die schnelle Darstellung auch größerer Ökosysteme und ist damit gerade für die Computergraphik eine wichtige Bereicherung.

6.1 Einleitung

Die Modellierung und Visualisierung großer komplexer Pflanzenszenen erfordert die Speicherung von großen Datenmengen und ist daher sehr zeitaufwendig. So enthält ein Quadratkilometer Wald Millionen von Pflanzen, Tausende von Bäumen und zahlreiche kleine Sträucher. Um diese komplexen natürlichen Szenen

zu modellieren, wurden in der Computergraphik verschiedene Methoden entwickelt.

In [29] wurde ein neuer stochastischer Algorithmus präsentiert, um Flächen mit einem kleinen Set von Wang Kacheln auf nicht-periodische Weise zu bedecken [38, 39]. Diese Methode erlaubt es, dass große Flächen mit komplizierten Texturen, Mustern oder beleuchteten Geometrien auf effiziente Weise modelliert und gerendert werden können. Wie bereits vorhergehend beschrieben, bestehen Wang-Kacheln bestehen aus einem Set von Vierecken gleicher Größe, in denen jeder Rand eine andere Farbe hat. Farblich zusammenpassende Ränder werden zusammengefügt, um eine Fläche zu parkettieren. In [29] wurde ein Set von acht Kacheln verwendet, um eine Fläche zu bedecken und eine zweidimensionale Poisson-Disk-Verteilung wurde angewandt, um die Kacheln mit den entsprechenden Positionsinformation zu füllen.

In einer Poisson-Disk-Verteilung hat jedes Objekt einen festen kreisförmigen Bereich, in der keine anderen Objekte liegen, und der mit keinem anderen Bereich überlappt, deshalb sehen die entsprechenden Szenen künstlich aus. Um diesen Fehler zu beseitigen, verwende ich das FON Modell [98, 107].

Um realistische natürliche Szenen entstehen zu lassen, verwende ich mehrere Sets von Kacheln anstatt nur einen Set. Jedes dieser Sets besteht aus 8 Kacheln. Alle Sets haben dieselbe Farbkodierung, jedoch unterscheiden sie sich durch die Intensität der Verteilung auf den Kacheln (siehe Abbildung 6.1). In der fertigen Szene ist die Intensität der Verteilung jeweils abhängig vom Terrain und der Menge der Nährstoffe in dem Bereich, in dem die Kacheln zu liegen kommt. So unterscheidet sich die Verteilungsintensität in einem nährstoffarmen Bereich von der in einem nährstoffreichen Bereich. Diese Methode führt jedoch dazu, dass der Unterschied zwischen den Pflanzen in den verschiedenen Nährstoffbereichen an den Kachel-Grenzen deutlich sichtbar ist. Ich beseitiige dieses Problem, indem ich mehrere Sets verwende und eine Art Antialiasing-Methode für die Selektion der zusammenpassenden Sets verwende.

6.2 Kachelbasierte Verteilung

Der Grund für die Verwendung von vier oder mehr Sets mit verschiedenen Intensitäten an den Rändern ist wie folgt: In Abbildung 6.2 (a) wird ersichtlich, dass der Bereich und auch die verschiedenen Stufen von Nährstoffen je nach Terrain unterschiedlich sind. Daher enthalten die in den weißen Kreisen mar-

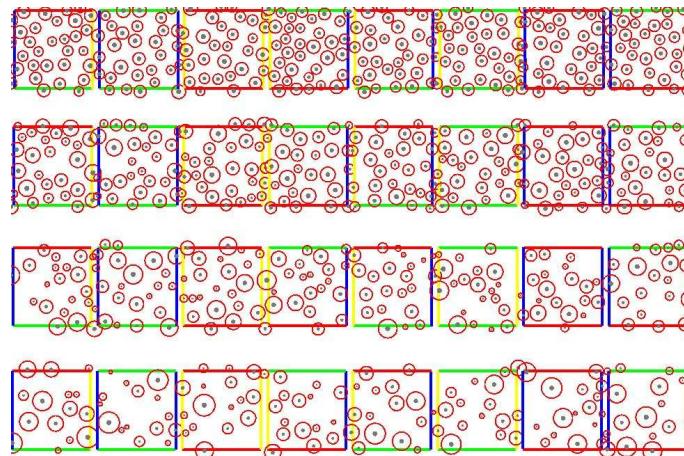


Abbildung 6.1: Vier Kachelgruppen mit unterschiedlicher Verteilungsintensität.

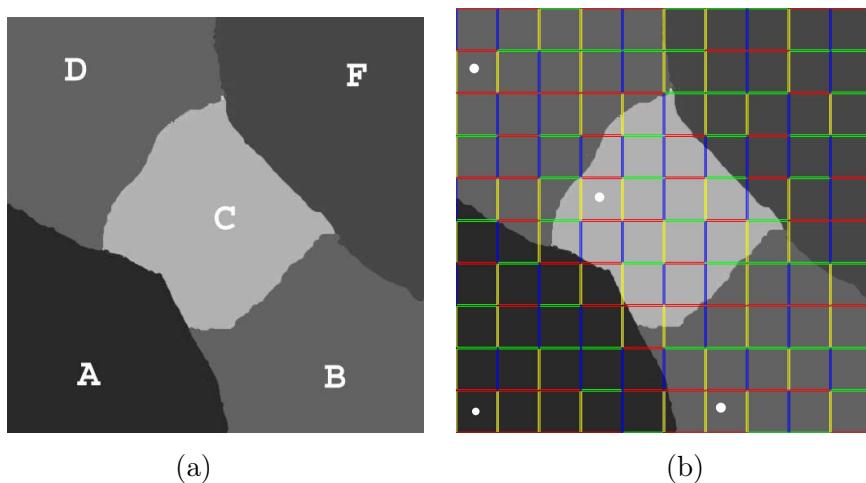


Abbildung 6.2: (a) Ein Feld mit fünf unterschiedlichen Intensitäten von Nährstoffen; (b) Ränder der resultierenden Kacheln, die später jeweils unterschiedliche Verteilungsdichten repräsentieren.

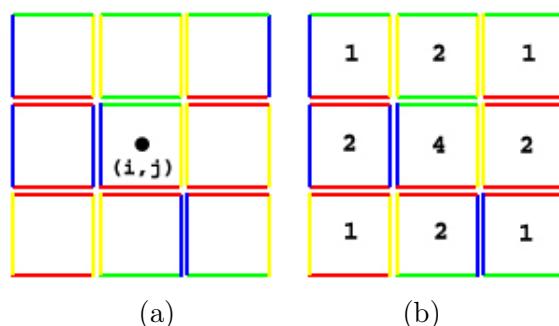


Abbildung 6.3: (a) Ein Fenster wird um den abzutastenden Wert (i, j) zentriert; (b) Filterkern mit Gewichtswerten.

kierten Kacheln aus Abbildung 6.2 (b) unterschiedliche Anzahlen von Pflanzen, obwohl alle markierten Kacheln die gleiche Randfarbe haben.

Um feine und weiche Grenze zwischen zwei unterschiedlichen Nährstoffbereichen zu erhalten, wird das Anti-Aliasing angewendet, welches ich durch Super-Sampling errechne:

$$I'(i, j) = \frac{1}{M} \sum_{p=S_i-k}^{S_i+k} \sum_{q=S_j-k}^{S_j+k} I(p, q) h(S_i - p, S_j - q) \quad (6.1)$$

Hier ist (i, j) die Position der effektiven Kachel (siehe Abbildung 6.3 (a)), S ist ein Skalierungsfaktor, h ist ein Filterkern der Größe k (siehe Abbildung 6.3). Die Gewichtung kann angepasst werden, um unterschiedliche Filterkerne zu implementieren.

Der Skalierungsfaktor M wird entsprechend der folgenden Gleichung berechnet.

$$M = \sum_{p'=0}^{2k} \sum_{q'=0}^{2k} h(p', q') \quad (6.2)$$

I ist somit der überabgetastete Wert des Nährstoffniveaus in einer Kachel. Um diesen Wert in einer Kachel zu bestimmen, wird das Nährstoffniveau unterschiedlicher Positionen in der jeweiligen Kachel abgetastet. Der Durchschnitt dieses überabgetasteten Nährstoffniveaus wird als Wert verwendet.

6.3 FON Verteilung

Um eine individuelle Kachel mit einer Intensität zu füllen, wird das Fon-Verteilungs-Modell (siehe dazu Abschnitt 4.2) verwendet. Um den Fon-Einflussbereich festzusetzen, wird eine nicht-lineare Funktion des basalen Radius verwendet (siehe dazu Gleichung (4.1)).

Die Anwendung der Kachelung und FON-Verteilung in Abbildung 6.4 (a) erzeugt das Ergebnis in Abbildung 6.4 (b). Die Anwendung der Super-Sampling Methode führt dazu, dass sich die Intensitäten der Pflanzen zwischen unterschiedlichen Intensitäten von Nährstoffen verändert haben.

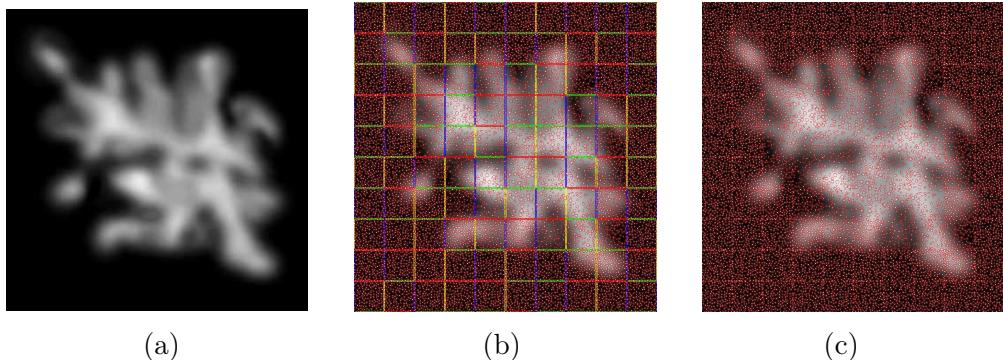


Abbildung 6.4: In (a) ist die Intensität der Pflanzenährstoffe dargestellt. In (b) wird die FON-Kachel Methode angewendet. (c) zeigt die Probleme an Kachelgrenzen.

6.4 FON Verfeinerung

In Abbildung 6.4 (c) sieht man, dass eine ungleiche Verteilung an den Rändern erzeugt wurde. Der Grund für diese Störung ist das Vorhandensein von Pflanzen am Rand jeweils benachbarter Kacheln. Um diese Störung zu beseitigen, verwende ich eine Verfeinerungsmethode für das FON Modell an den Rändern der Kacheln.

Die FON Verfeinerungsmethode besteht darin, dass jede am Rand einer Kachel angesiedelte Pflanze mit den anderen am Rand der entsprechenden Nachbarkacheln angesiedelten Pflanzen geprüft wird, um festzustellen, ob der FON-Bereich dieser Pflanze mit den FON-Bereichen der Nachbarpflanzen überlappt, und ob diese Pflanze kleiner gegenüber der Nachbarpflanze ist, und ob die Größe des Überlappungsbereichs gleich einer bestimmten Schwelle ist oder größer. Wenn dies zutrifft, muss die kleinere Pflanze aus der Kachel gelöscht werden.

Aus Abbildung 6.5(a) wird ersichtlich, dass die Pflanze 1 kleines ist, deshalb muss diese Pflanze aus der Kachel gelöscht werden. Pflanze 2 ist größer als ihr Nachbar, deshalb muss diese gelöscht werden.

Abbildung 6.5(b) stellt das Ergebnis der kachelbasierten Darstellung nach der Verfeinerung dar. Die Verteilung der Pflanzen ist feiner und realistischer als in Abbildung 6.4, die Störungen an den Kachelkanten wurden beseitigt.

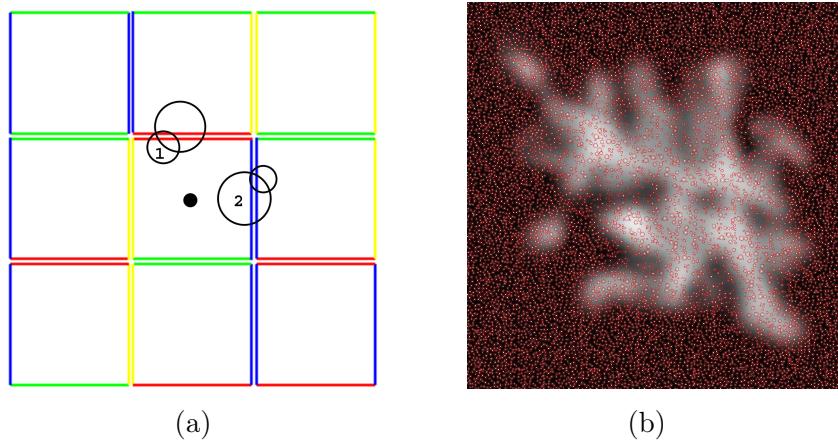


Abbildung 6.5: a) FON Kreise für zwei Zustände an den Rändern einer Kachel;
b) Als Ergebnis zu der Anwendung der FON-Verfeinerung auf (c) in (Abbildung 6.4) wurde die Störung zwischen den Kacheln beseitigt.

6.5 Weiche Intensitätsübergänge

In Abbildung 6.6 sehen wir, dass der Unterschied der Pflanzenintensität zwischen Kachel A und B , C und D ein treppenstufenartiges Muster erzeugt. Durch dieses Muster entsteht ein unrealistischer Eindruck in Bezug auf die Verteilung in einer Pflanzenszene. Um dieses Problem zu lösen, wird eine Verfeinerungsmethode auf Kachel A angewendet. Die Anwendung der Verfeinerungsmethode wird in folgenden Schritten vorgenommen:

1. Man testet, ob sich die Intensität in A von der Intensität in B , C und D unterscheidet.
2. Die Kachel A wird in zwei diagonale Teile (Unterteil U und Oberteil O) geteilt, und mit zwei unterschiedlichen Intensitäten ausgefüllt (Abbildung 6.7).
3. Die Intensität im Teil O ist abhängig von den Intensitäten in den Kacheln B , C und D . Die Anordnungen von B , C und D kontrollieren hingegen die Intensität U .
4. Die bereits beschriebene FON-Verfeinerung wird zwischen den beiden diagonalen Teilen angewendet.

Die Anwendung der Schritte produziert eine feine natürliche Pflanzenverteilung ohne Treppen, wie Sie auch schon in Abbildung 6.5(b) zu sehen ist.

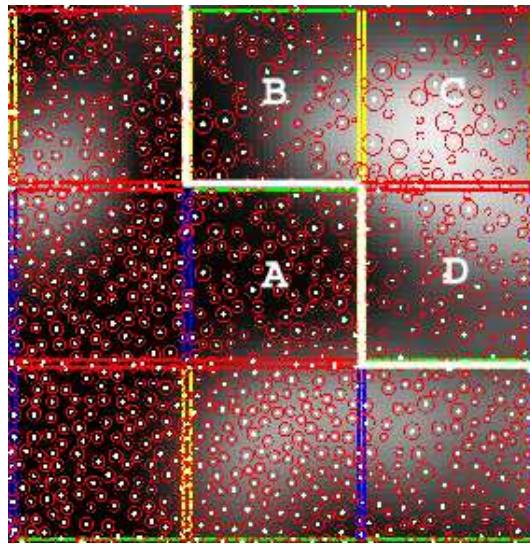


Abbildung 6.6: Die Intensitäts-Treppe zwischen die Kachel A und die Kacheln B , C und D .

6.6 Anwendung der Methode

Anwendung dieser Methode erzeugt eine gute Qualität einer natürlichen Pflanzenszene, so dass das Rauschen zwischen den Kacheln und damit die Störungen zwischen zwei unterschiedlichen Nährstoffbereichen verringert werden. Zusätzlich können solche Szenen in Echtzeit gerendert werden. Um diese Methode zu implementieren, wird ein diskretes System von mehreren Sets verwendet. Die Anwendung dieses Systems geschieht in folgenden Schritten:

1. Wir erzeugen unterschiedliche Sets. Jedes Set hat eine andere Pflanzenintensität.
2. Jede Pflanze wird durch zwei Kreise dargestellt. Der erste Kreis repräsentiert die Größe der Pflanze, und der zweite stellt den FON-Bereich der Pflanze dar.
3. Wir verwenden die Wang-Kachel Methode für unterschiedliche Sets, um die gesamte Fläche mit Kacheln zu bedecken (zu parkettieren).
4. Um die Störungen zwischen den Kacheln zu beseitigen, wird die FON-Verfeinerungsmethode verwendet.
5. Um die Treppe zwischen Kacheln zu beseitigen, wird die Treppen-Verfeinerungsmethode angewendet.

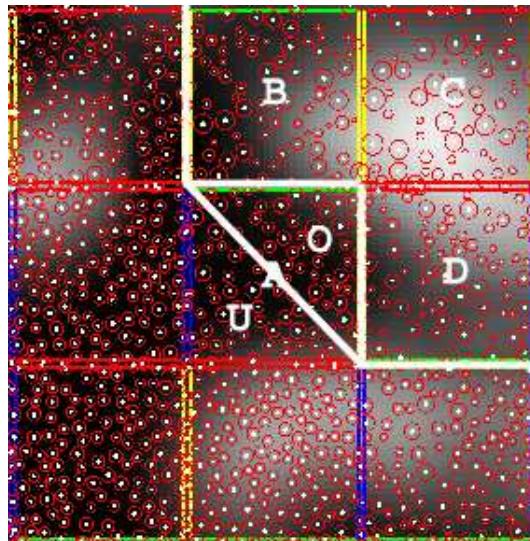


Abbildung 6.7: Verteilung der Kachel A zu zwei Teil U und O .

Die Pflanzen für dieses Systeme wurden mit dem Xfrog Software Systeme [73] modelliert, und dann in unser System als POVRAY MESH2 in (Abbildung 6.8 und 6.9) importiert

6.7 Ergebnisse

Die Anwendung der FON-Verfeinerung und der Treppen-Verfeinerung in einer Szene produziert feine Kanten zwischen den Kacheln und weiche Übergänge zwischen unterschiedlichen Nährstoffintensitäten (siehe Abbildungen 6.10 und 6.11).

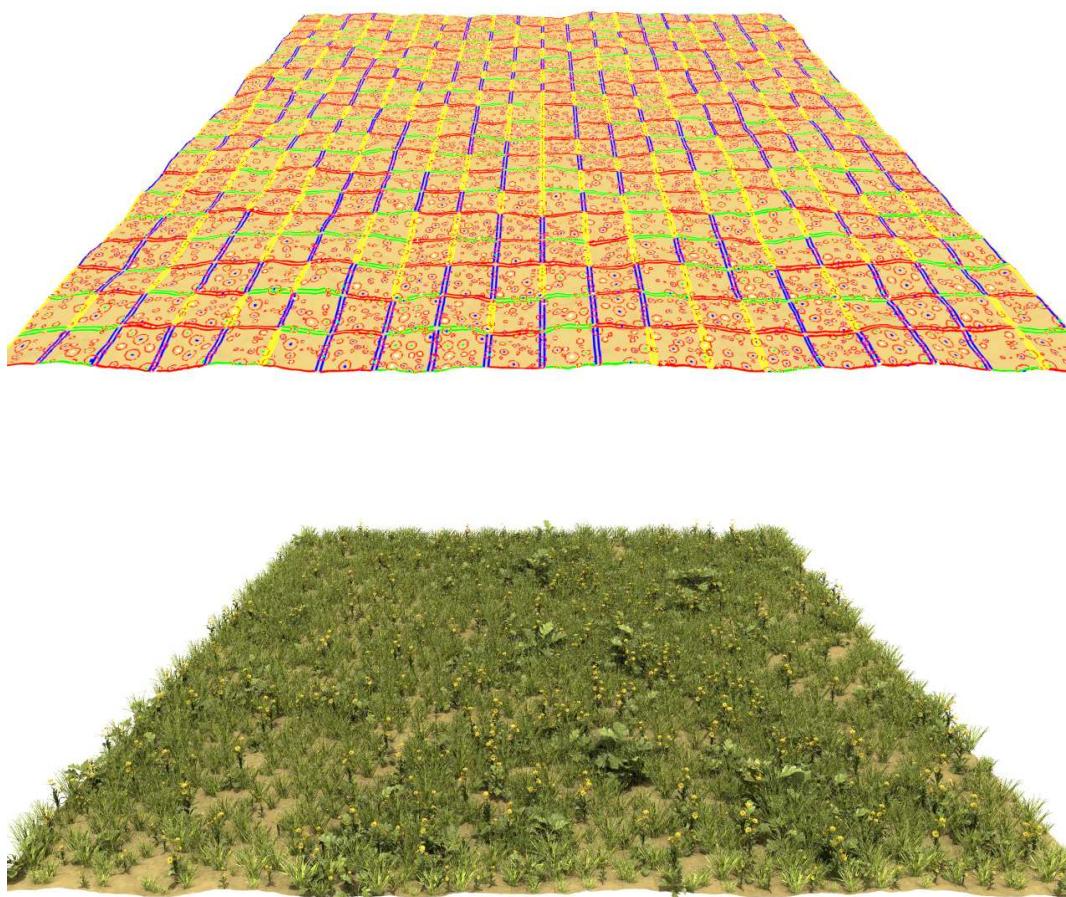


Abbildung 6.8: Diese Abbildung stellt eine Szene mit einer Wiese unter Verwendung der Wang Kachel Methode mit unterschiedlichen Intensitäten der Nährstoffe dar.

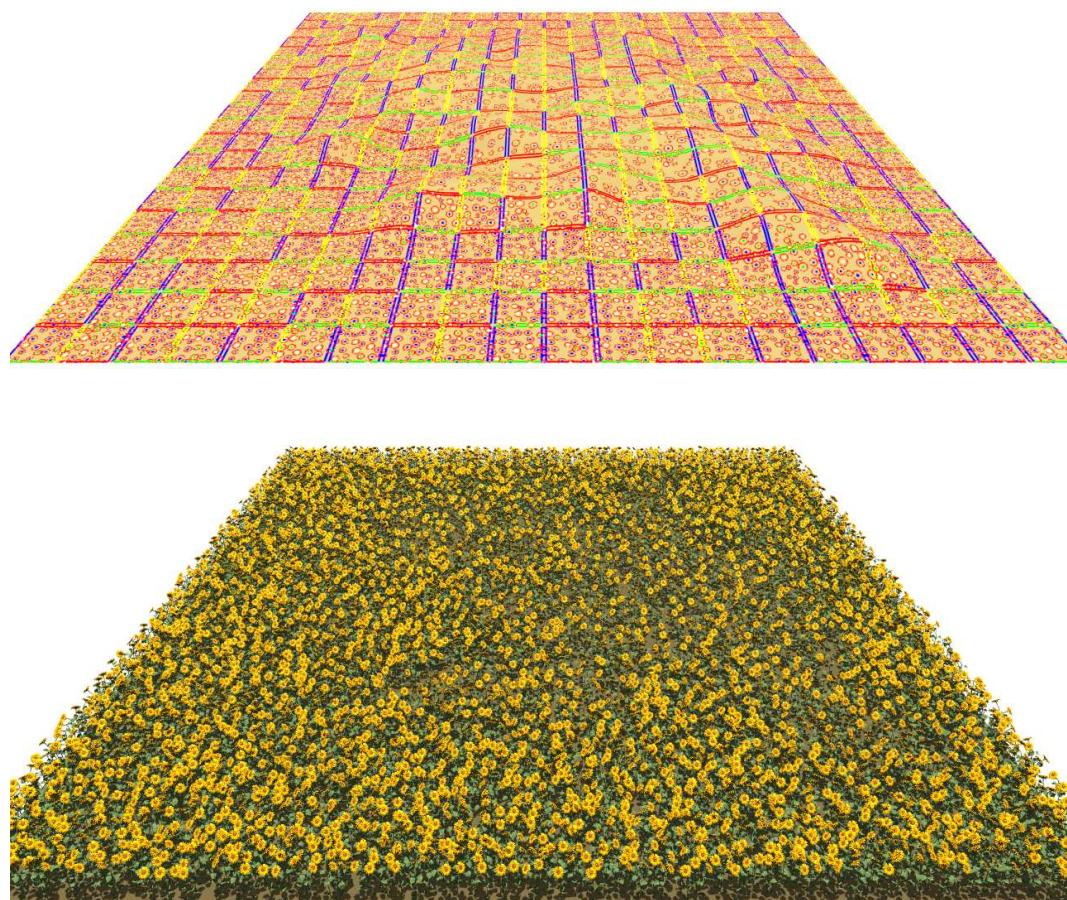


Abbildung 6.9: In dieser Abbildung sind unterschiedliche Nährstoffintensitäten für ein Feld von Sonnenblumen dargestellt.



Abbildung 6.10: In dieser Abbildung sind unterschiedliche Nährstoffintensitäten für einen aufgelockerten Wald dargestellt.



Abbildung 6.11: In dieser Abbildung sind unterschiedliche Nährstoffintensitäten für einen dichten Wald dargestellt.

Kapitel 7

Erweiterung des Konkurrenzverhaltens

Die Methode, die in diesem Kapitel vorgestellt wird, ist ein neues Verfahren zur Darstellung und Rendering der Konkurrenz zwischen unterschiedlichen Pflanzenwurzelsystemen, in welchem der Überlappungsbereich der Erschöpfungszone zwischen konkurrierenden Wurzelsystemen quantitativ festgestellt wird. Wir haben unterschiedliche Zustände für Nährstoffkonkurrenz zwischen unterschiedlichen Pflanzenwurzelsystemen visualisiert. Zusätzlich wird die Lichtkonkurrenz im Bereich als symmetrische und asymmetrische Konkurrenz dargestellt. Dies hängt vom Durchsichtigkeitsfaktor der Pflanzenblätter und Dichte des Pflanzenskeletts ab. Im Anschluss daran stellen wir eine neue Konkurrenzsimulation für Ammenpflanzen vor. Schließlich wird die Konkurrenz zwischen einer gesunden Pflanze und einer anderen, die zu einem beliebigen Zeitpunkt erkrankt, simuliert und visualisiert.

7.1 Einführung

In den vorangehenden Kapiteln wurde die Konkurrenz zwischen unterschiedlichen Pflanzenarten im Untergrundbereich und oberhalb der Erde erörtert. Das Resultat wurde eingesetzt, um realistischere Ökosystemszenen darzustellen und zu visualisieren.

Dieses Kapitel ist eine Erweiterung zu den Arbeiten in Kapiteln 4 und 5. Mein Verfahren adressiert vier Hauptbereiche in der Ökosystem-Visualisierung. Im ersten Teil entwickle ich ein neues Verfahren, in welchem die Wurzelkonkurrenz zwischen den benachbarten Pflanzen dargestellt wird, wobei zwei unterschied-

liche Arten von Wurzelsystemen erzeugt werden, die in einem geometrischen Simulationsmodell der Wurzelsystemarchitektur verwendet werden.

Im zweiten Teil erweitere ich die Konkurrenz um das Licht, welche durch die Baum-Geometrie und der Charakteristik des Blattwerks, z.B. der Zweig- und Blattintensität hervorgerufen wird. Hier ist die Konkurrenz nicht immer eine asymmetrische Konkurrenz, da sich die Konkurrenz um das Licht während des Laufs der Sonne verändert.

Im dritten Bereich simuliere und visualisiere ich die Konkurrenz zwischen Ammenpflanzen und anderen Pflanzenarten. Eine Ammenpflanze fördert das Wachstum ihrer andersartigen Nachbarn. Einige positive Effekte des Konkurrenzverhaltens sind der Schutz gegen übermäßige Sonnenstrahlung, dem daraus resultierenden Wasserverlust und gegen Pflanzenfresser [7]. Ein klassisches Beispiel solcher positiven Nachbareffekte sind Ammenpflanzen in trockenen Bodenverhältnissen wie beispielsweise der Wüste [45].

Die letzte Erweiterung ist die Simulation der Konkurrenz zwischen gesunden Pflanzen und anderen Pflanzen, die zu einem beliebigen Zeitpunkt während des Simulationsprozesses erkranken. Um hier eine große Szene von unterschiedlichen Pflanzenarten in Echtzeit zu rendern, verwende ich wieder die Wang-Kachel Methode aus Kapitel 6 zur Visualisierung der 3D-Pflanzenarchitekturen.

7.2 Die Konkurrenz um das Licht

Eine Konkurrenz zwischen benachbarten Pflanzen um das Licht findet dann statt, wenn ihre Pflanzensprosse einander überlappen. Diese Überlappung verursacht einen Mangel an Licht für die kleineren Pflanzen. Abbildung.7.1 (a) und 7.1 (b) zeigen, dass die kleinen Pflanzen, die unter dem Baum in Abbildung.(7.1) (a) wachsen, nur einen geringen Teil vom Licht erhalten (symmetrische Konkurrenz), wogegen die kleinen Pflanzen, die unter dem Baum in Abbildung.(7.1) (b) wachsen, fast kein Licht erhalten (asymmetrische Konkurrenz).

Aus diesem Grund findet die Konkurrenz um das Licht entweder symmetrisch oder asymmetrisch oder als eine Mischung von beiden statt. Dies ist abhängig vom Durchsichtigkeitsfaktor L_{fac} der großen Pflanze. Die Konkurrenz um das Licht α_i wird mit Berücksichtigung der Bereichsindex der Überschneidung $F(i, j)$ von Baum i mit dem Baum j aus [61] wie folgt festgestellt [59, 107]:

$$\alpha_i = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{k * \beta_{ij}}{F(i,j)}}{A_i} \quad (7.1)$$

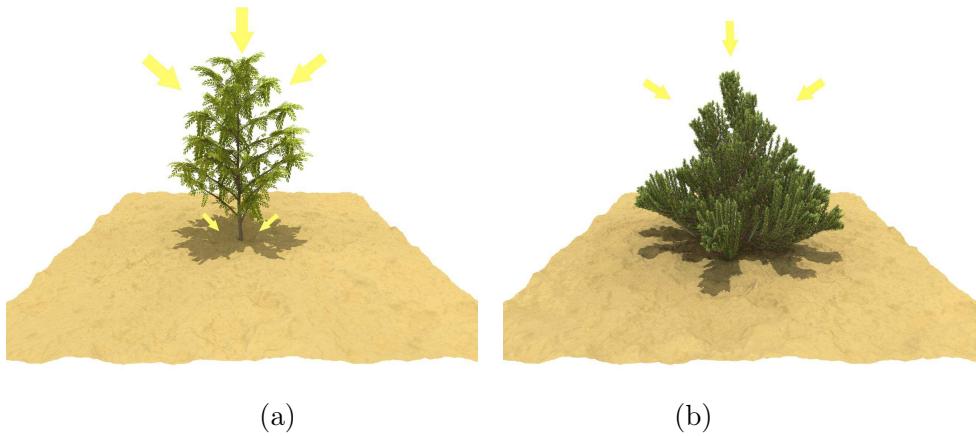


Abbildung 7.1: a) Ein nicht dicht bewachsener Baum ermöglicht den kleinen Pflanzen das Licht zu erhalten, welches durch das Blattwerk dringt. b) Ein dicht bewachsener Baum bildet dunkle Schatten und daher erhalten die kleinen Pflanzen kein Licht.

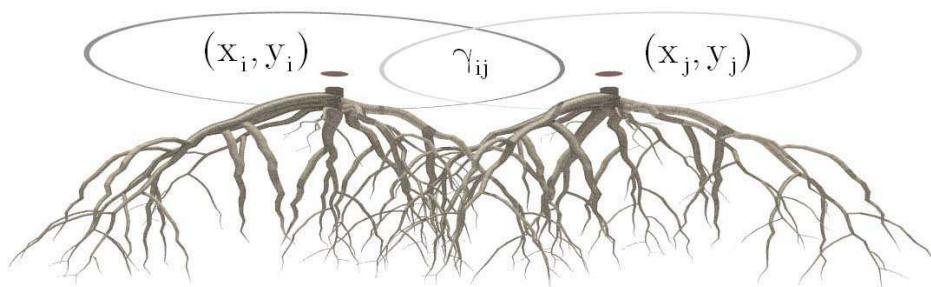


Abbildung 7.2: Die Geometrie der räumlichen Konkurrenz zwischen den individuellen Pflanzen i und j mit Position (x_i, y_i) und (x_j, y_j) ist eine Funktion des Überlappungsbereichs γ_{ij} .

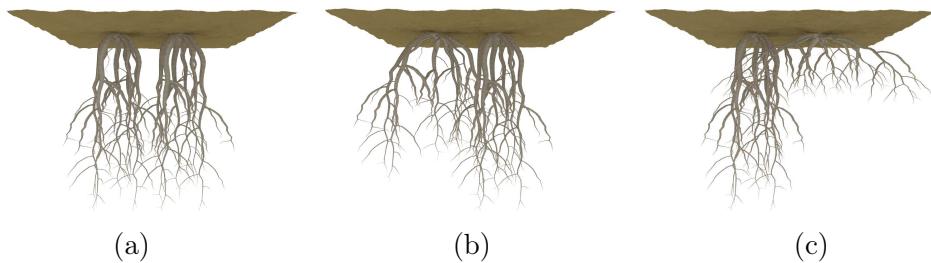


Abbildung 7.3: Drei unterschiedliche Wurzelkonkurrenzsysteme. In (a) die Konkurrenz ist zwischen tiefen und tiefen Wurzelsystemen. In (b) ist die Konkurrenz zwischen mittel-tiefen und tiefen Wurzelsystemen. In (c) die Konkurrenz ist zwischen tiefen und flachen Wurzelsystemen.

Wobei A_i die Grösse der Kreise i ist, k eine Konstante, n die Anzahl der Pflanzen, die mit der i -te Pflanze überlappen und β_{ij} wird wie folgt berechnet:

$$\beta_{ij} = (q + L_{fac}) \frac{\gamma_{ij}}{2q} \quad (7.2)$$

γ_{ij} ist die Grösse des Überlappungsbereichs zwischen der Pflanze i und der Pflanze j (siehe Abbildung 7.2). $L_{fac} \in [0, q]$ ist der Durchsichtigkeitsfaktor. Wenn $L_{fac} = 0$ ist, wird die Konkurrenz um das Licht als symmetrisch betrachtet. Wenn $L_{fac} = q$ ist, wird die Konkurrenz um das Licht als asymmetrisch betrachtet.

7.3 Die Konkurrenz durch Wurzelsysteme

Die Konkurrenz um Nährstoffe ist von unterschiedlichen Faktoren abhängig, wie beispielsweise der Wurzeldichte, dem Ausmaß der Wurzelfläche, und der Plastizität im Wurzelwachstum [9]. Um diese Konkurrenz darzustellen und zu visualisieren, wird die Wurzeldichte und das Ausmaß der Wurzelfläche berücksichtigt. Die Konkurrenz zwischen tiefen Wurzelsystemen und flachen Wurzelsystemen beträgt nur die Hälfte der Konkurrenz tiefer Wurzelsysteme mit anderen tiefen Wurzelsystemen [93, 30].

Um die Konkurrenz um die Nährstoffe darzustellen und zu visualisieren, wird die Konkurrenz als symmetrische Konkurrenz betrachtet und auf neun Zustände beschränkt. Die Tabelle 7.1 stellt neun Zustände dar, die die Konkurrenz zwischen drei unterschiedlichen Wurzelsystemen präsentieren. Dabei stehen F , C und T für flache, mitteltiefe und tiefe Wurzelsyste. In Abbildung 7.3 wurden



Abbildung 7.4: Drei Stufen der Farbveränderung durch Krankheit.

drei Zustände dieser Tabelle (tiefe vs. tiefe, tiefe vs. mitteltiefe und tiefe vs. flache Wurzel) dargestellt.

	F	C	T
F	FF	FC	FT
C	CF	CC	CT
T	TF	TC	TT

Tabelle 7.1: Konkurrenzart zwischen drei unterschiedlichen Wurzelsystemen.

Die Konkurrenz um einen Nährstoff σ_i wird unter der Berücksichtigung der Wurzelgröße und der Wurzeldichte T_f in der folgenden Gleichung definiert [59, 61].

$$\sigma_i = \frac{\gamma_{ij}}{2 * A_i} \left(1 + \frac{T_f}{m}\right) \quad (7.3)$$

$T_f \in [0 \text{ m}]$ ist hierbei ein Faktor, der für Wurzelgröße und Wurzeldichte steht. Hier liegt die symmetrische Konkurrenz im Intervall $[\frac{\gamma_{ij}}{2 * A_i}, \frac{\gamma_{ij}}{A_i}]$.

7.4 Ammenpflanzen

Manche Wüstenpflanzen können nur in der Nähe von größeren Pflanzen, wie z.B. Sträuchern, wachsen, weil der Schatten der größeren Pflanzen einen Schutz für die kleinen Pflanzen gegen die intensive Solarstrahlung und die daraus resultierende Hitze bietet. Daher haben die kleinen Pflanzen ein System entwickelt, in dem sie ihre Samen unter Sträuchern deponieren. Das Wachstum von Pflanzen in der Wüste wird immer durch negative Effekte einer überreichlichen Solarstrah-

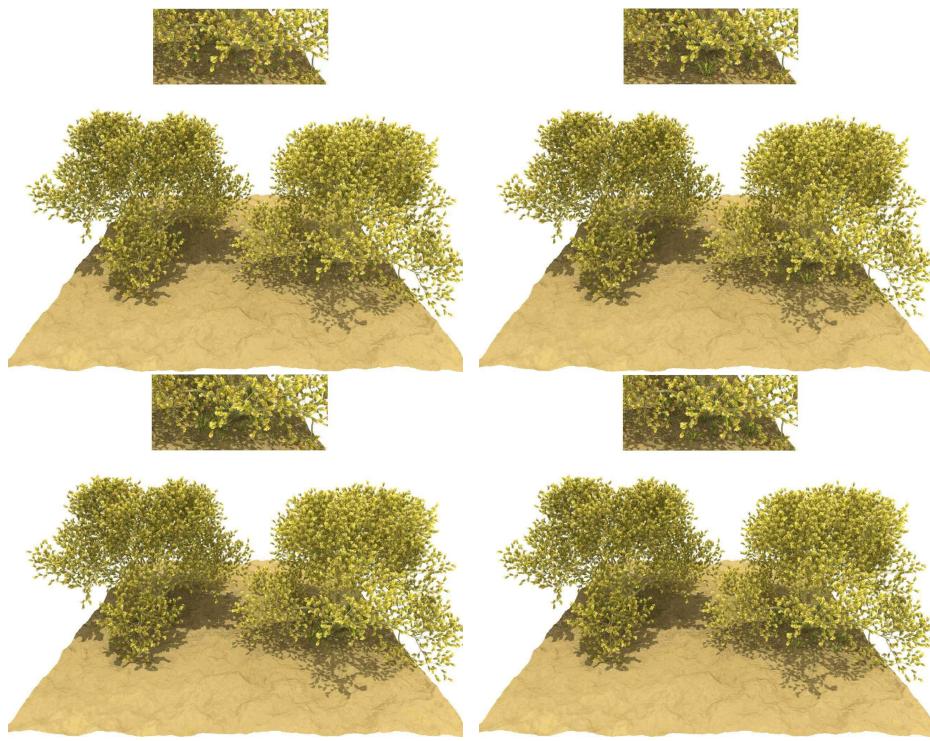


Abbildung 7.5: Vier Stufen einer Wachstumsimulation, wie kleine Pflanzen unter Sträuchern wachsen.

lung beeinflusst, während die Pflanzen in einer anderen Umgebung um genau diese Ressource konkurrieren (siehe Abbildung 7.5).

7.5 Konkurrenz zwischen gesunden und kranken Pflanzen

Um die Konkurrenz zwischen einer gesunden Pflanze und einer anderen Pflanze, die zu einem beliebigen Zeitpunkt plötzlich krank wird, zu simulieren und zu visualisieren, wird ein Krankheitsfaktor in der Konkurrenz berücksichtigt. Der Einfluss der kranken Pflanze auf die gesunde nimmt mit der Zeit allmählich ab, daher wird die gesunde Pflanze vom Einfluss der kranken Pflanze allmählich befreit.

Die Konkurrenz um Nährstoffe zwischen einer kranken und einer gesunden Pflanze wird hier in der folgenden Gleichung festgelegt.

$$\sigma_i = \frac{\gamma_{ij}}{2 * A_i} \left(1 + \frac{T_k}{s}\right) \quad (7.4)$$

Dabei ist $T_k \in [0, 2s]$ der Krankheitsfaktor. Er nimmt mit der Zeit allmählich ab, deswegen wächst die gesunde Pflanze nach einer bestimmten Zeit ohne Konkurrenz. Die Blattfarbe der krank werdenden Pflanze ändert sich ebenfalls mit der Zeit (siehe Abbildung 7.4).

Die allgemeine Konkurrenz zwischen Pflanzen wird daher insgesamt durch die folgende Gleichung beschrieben:

$$\varphi_i = p\alpha_i + (1 - p)\sigma_i \quad (7.5)$$

Hierbei ist φ_i die allgemeine Konkurrenz, welche die $i - te$ Pflanze durch ihren Nachbarpflanzen erleidet, $p \in [0, 1]$ ist der Anteil der symmetrischen Konkurrenz um Nährstoffe an der allgemeinen Konkurrenz.

7.6 Beispiele

In Abbildung.7.6 wird die Konkurrenz um das Licht zwischen einem nicht dicht bewachsenen Baum und verschiedenen kleineren Pflanzen dargestellt. Die Verwendung eines interaktiven Systems, in dem das Wachstum der Pflanzen mit unterschiedlichen Wachstums-Parametern dargestellt wird, visualisiert einen Imitator der Natur. Abbildung.7.6 zeigt, dass die kleinen Pflanzen unter dem Baum wachsen können, weil sie einen Teil des Lichts erhalten.

In Abbildung.7.7 wird die Konkurrenz um das Licht zwischen einem dicht bewachsenen Baum und unterschiedlichen kleineren Pflanzen visualisiert. Diese Abbildung illustriert, dass die kleinen Pflanzen unter dem Baum nicht wachsen können, weil sie kein ausreichendes Licht erhalten.

In Abbildung.7.9 wird die Konkurrenz um Nährstoffe zwischen Ammenpflanzen simuliert. Hier haben die Ammenpflanzen einen positiven Einfluss auf die kleinen Pflanzen. Die kleinen Pflanzen beeinflussen sich gegenseitig negativ. Durch den positiven Einfluss wird Gleichung 7.5 folgendermaßen modifiziert:

$$\varphi_i = p\alpha_i - (1 - p)\sigma_i \quad (7.6)$$

In Abbildung.7.5 und 7.9 wird veranschaulicht, dass die kleinen Pflanzen nur im Schutz der Ammenpflanzen wachsen. In Abbildung.7.8 ist die Konkurrenz für Nährstoffe zwischen dichten Baumwurzeln und flachen Baumwurzeln dargestellt. Aus diesen Abbildungen kann außerdem ersehen werden, dass die flache Wurzel

langsamer als die tiefe Wurzel wächst, weil die tiefe Wurzel stärker als die flache Wurzel ist.

Aus Abbildung 7.10 ersehen wir, dass je stärker eine Pflanze erkrankt, desto schneller andere Pflanze wachsen, weil die Konkurrenz zwischen den Pflanzen mit der Zeit abnimmt.

7.7 Ergebnisse

Mit diesem Verfahren erhalte ich natürliche wirkende Szenen, in denen die Konkurrenz um Ressourcen zwischen unterschiedlichen Arten von Pflanzen in verschiedenen Bereichen und in verschiedenen Zuständen der Konkurrenz simuliert wird. Im beiliegenden Material habe ich diese Szenen in einem Video-Film veranschaulicht. Der Film visualisiert die Anwendung unseres Systems in den folgenden Anordnungen.

- Die Konkurrenz um das Licht zwischen einem nicht dicht bewachsenen Baum und unterschiedlichen kleinen Pflanzen.
- Die Konkurrenz um Licht zwischen einem dicht bewachsenen Baum und unterschiedlichen kleinen Pflanzen.
- Die Konkurrenz um Nährstoffe von Pflanzen mit verschiedenen Wurzelsystemen.
- Die Konkurrenz zwischen kranken und gesunden Pflanzen.
- Die Konkurrenz zwischen Ammenpflanzen und kleinen Pflanzen.

Der Film illustriert, dass Tausende kleiner Pflanzen mit dem großen Baum um verschiedene Ressourcen konkurrieren. Um das Wachstum der vielen Pflanzen interaktiv in der Echtzeit zu rändern, wurde wieder die Wang-Kachel Methode verwendet.

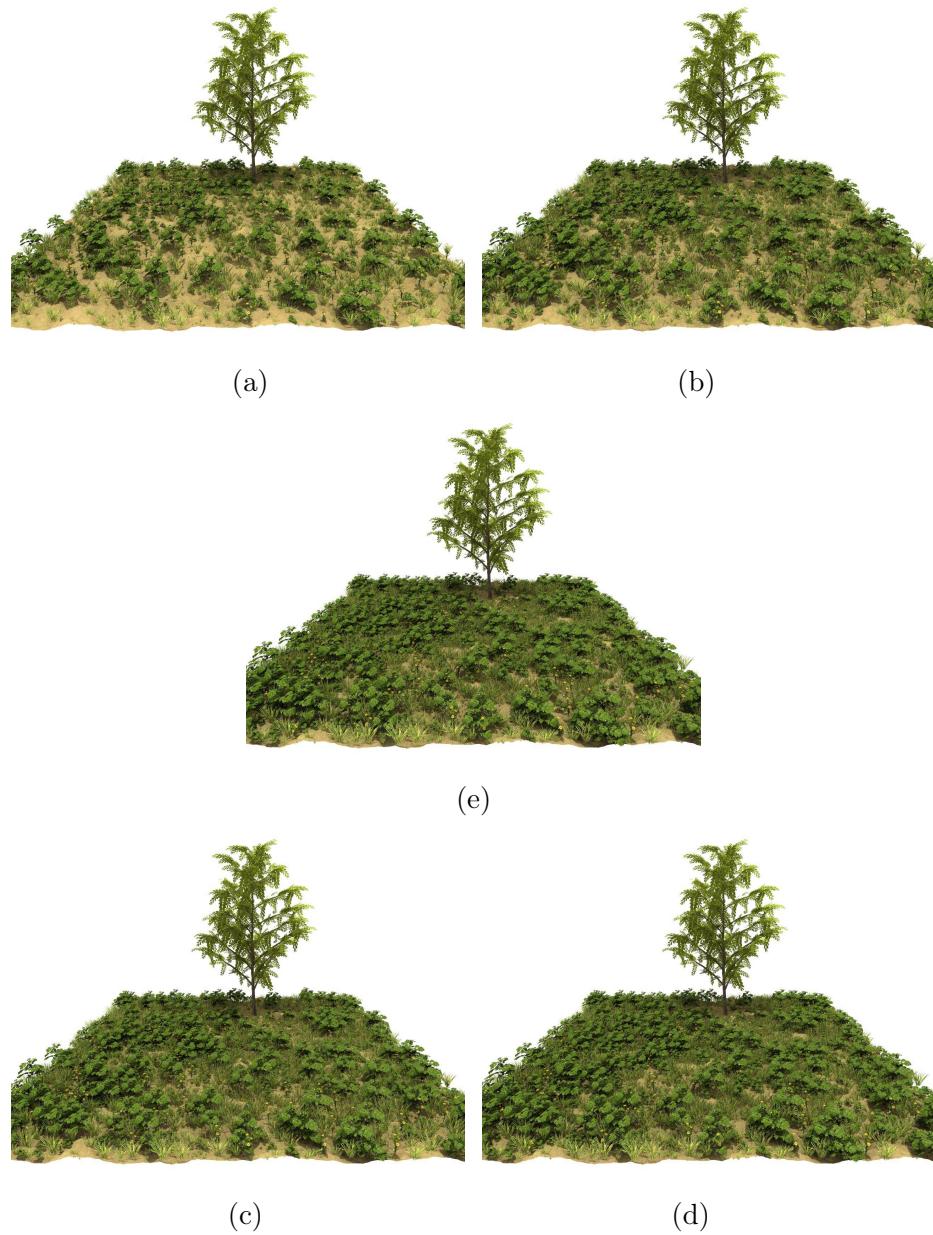


Abbildung 7.6: Konkurrenz um Licht zwischen einem lichtdurchlässigen Baum und unterschiedliche kleinen Pflanzen.

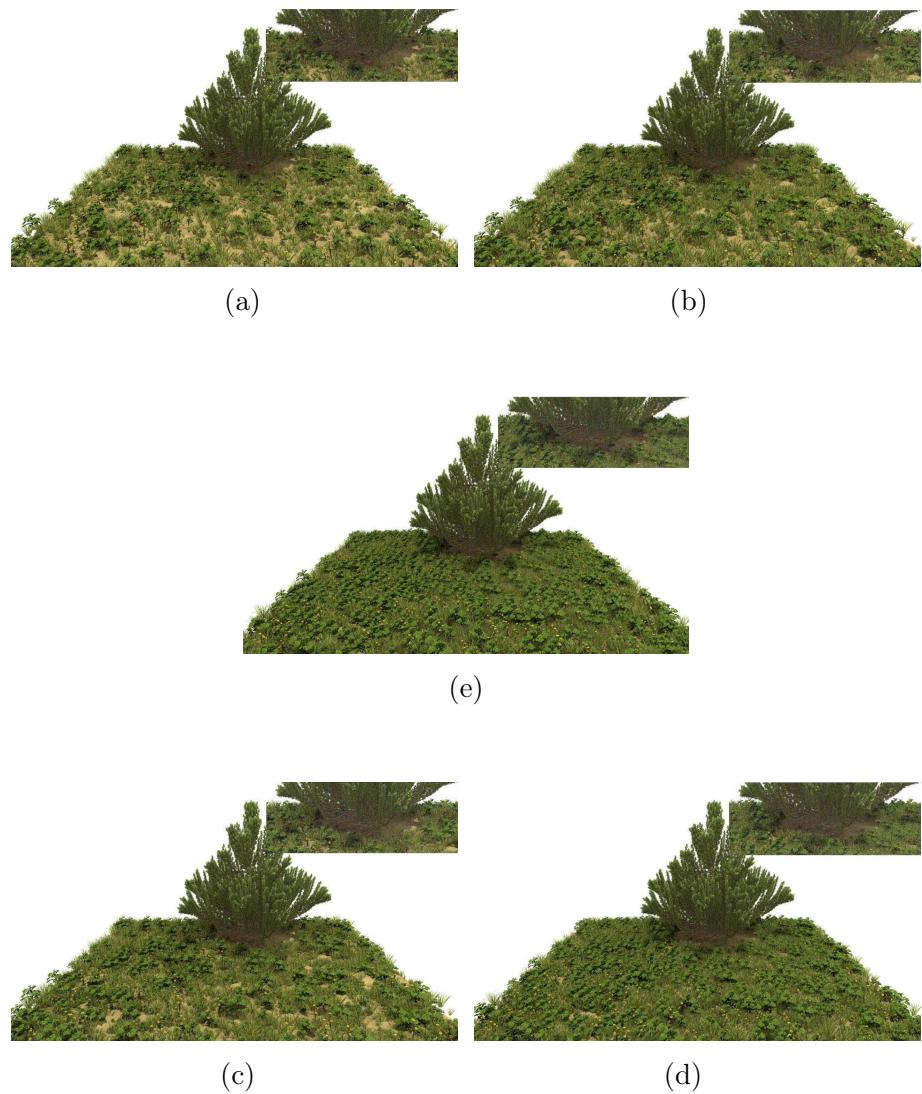


Abbildung 7.7: Konkurrenz um Licht zwischen einem dichten Baum und unterschiedliche kleinen Pflanzen.

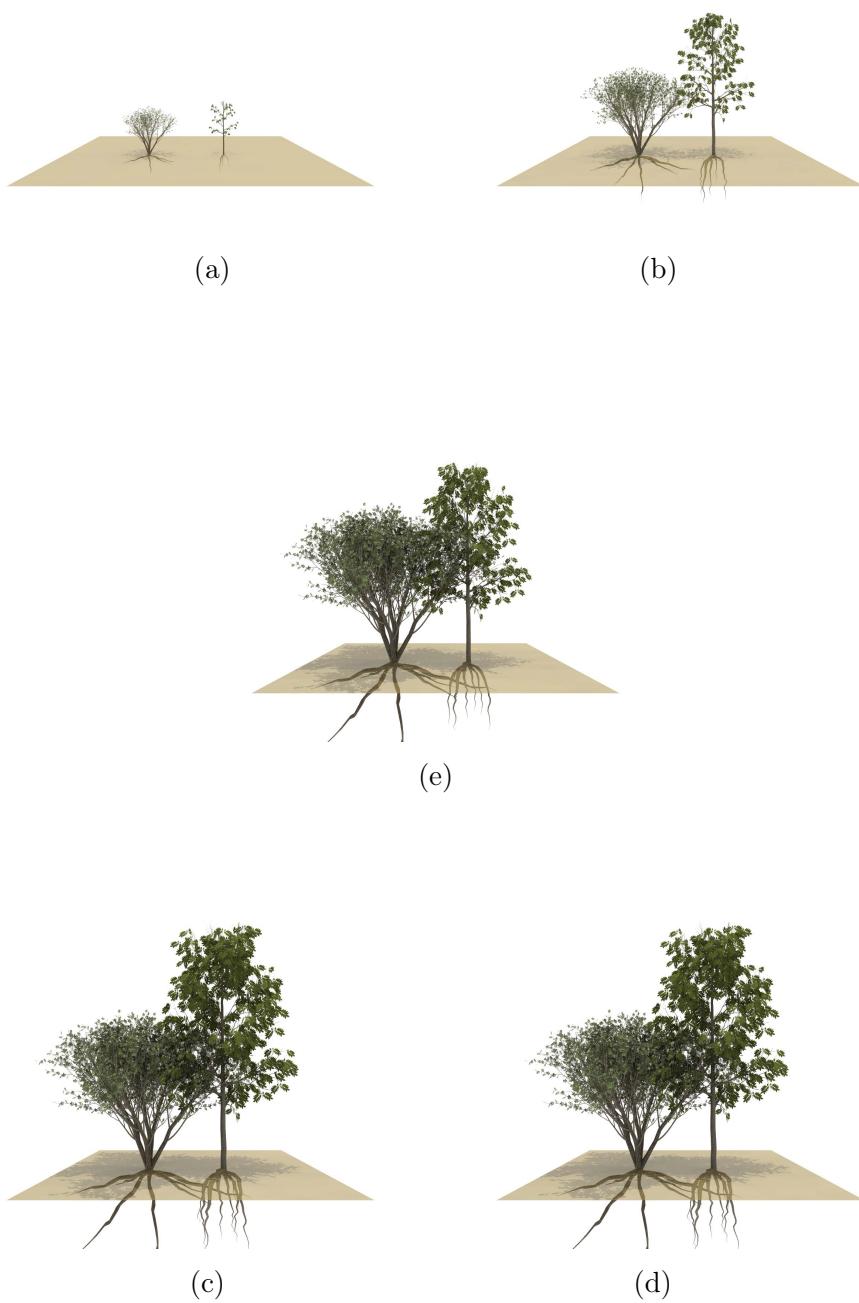


Abbildung 7.8: Konkurrenz um Nährstoffe mit verschiedenen Wurzelsystemen.

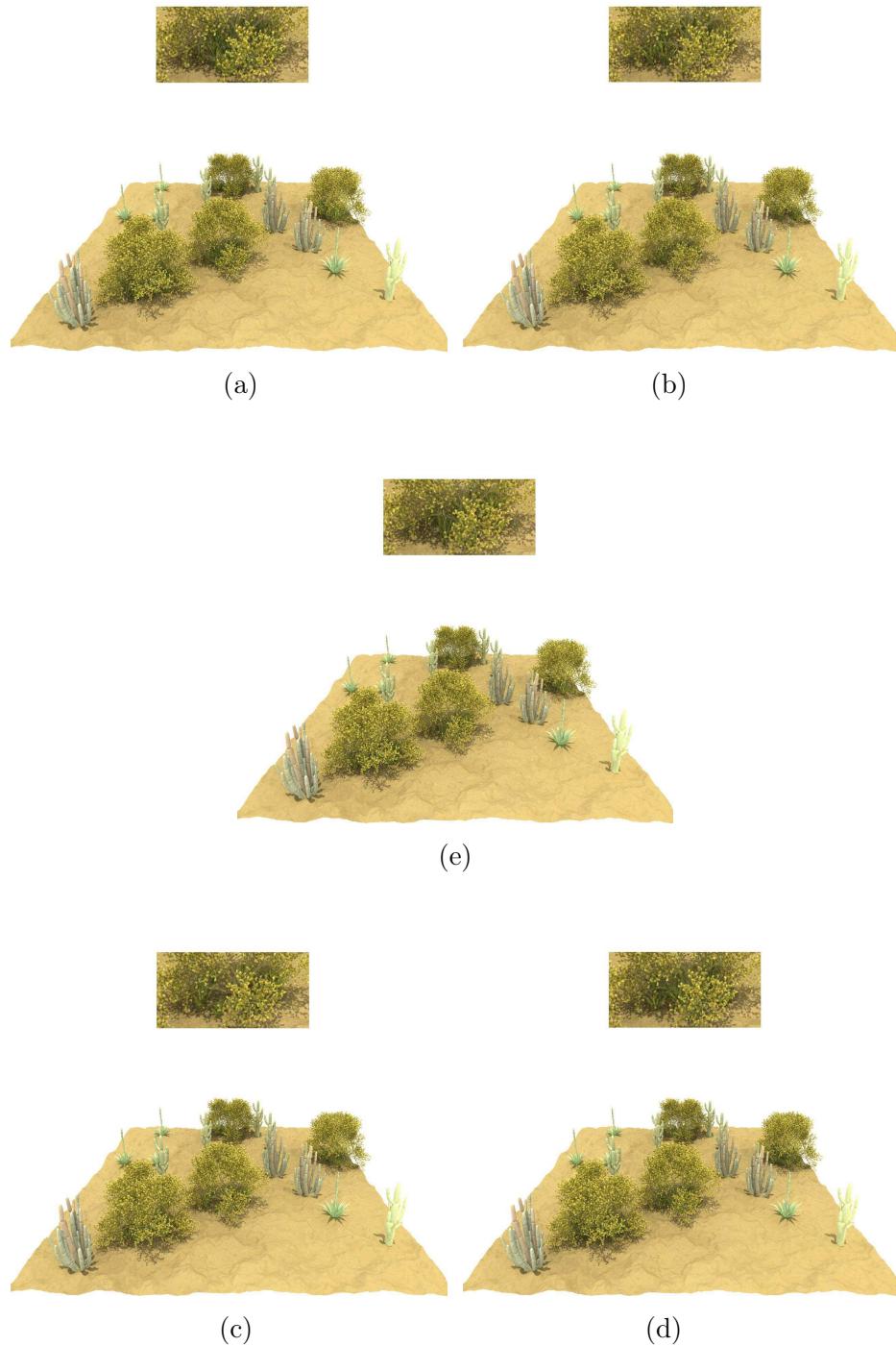


Abbildung 7.9: Konkurrenz zwischen Ammepflanzen und kleinen Pflanzen.

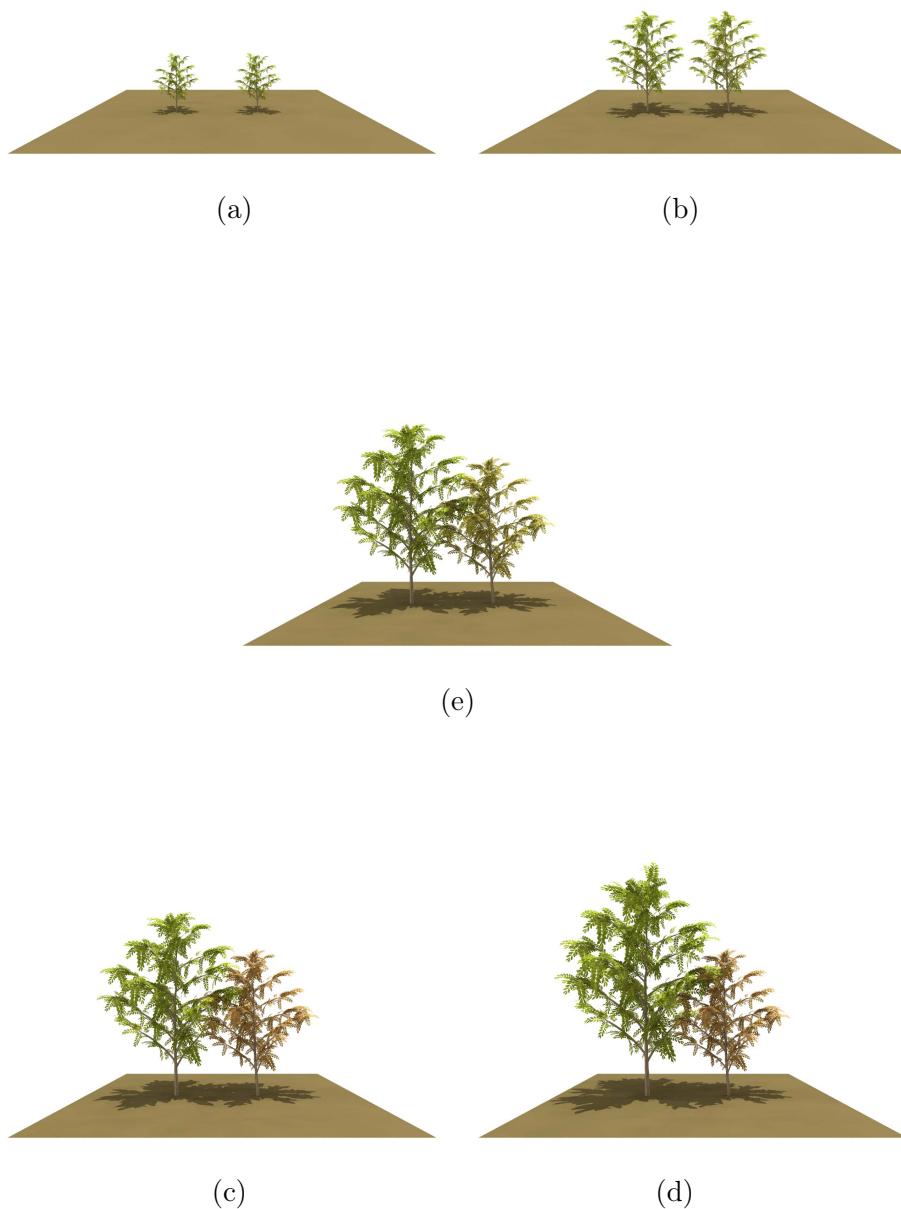


Abbildung 7.10: Konkurrenz zwischen einer kranken und einer gesunden Pflanzen.

Kapitel 8

Äußere Einflusseffekte

Dieses Kapitel ergänzt die vorhergehenden Methoden durch ein Verfahren zur Simulation der Alterung von Blättern. Hiermit wird die Wachstumssimulation visuell unterstützt. Nährstoffmangel, intensive Hitze, Altern der Pflanzen oder Insekten erzeugen eine Veränderung der Blattfarbe. Beispielsweise verfärbt sich der Rand eines Blattes oder andere Blattbereiche durch diese externen Einflüsse rot oder gelb. Zusätzlich kann durch Pflanzenfresser eine Veränderung der Blattform verursacht werden.

8.1 Relevante Arbeiten

Das Blattfarben-Modell und die Veränderung der Blattfarbe, die sich aus der Interaktion zwischen verschiedenen Blätterpigmenten und Blattaderungen ergeben, sind eines der schönsten Naturphänomene. Sie stellen eine interessante und wichtige Herausforderung für die Modellierung und das realistische Rendering in der Computergraphik dar. Diese Herausforderung beruht nicht nur auf der biologischen Vielfalt und verschiedenartigen Pflanzen, die miteinander und mit ihrer Umgebung interagieren, sondern auch auf den vielen Details, die modelliert und visualisiert werden müssen, um realistische Bilder zu erzeugen. In diesem Kapitel fokussiere ich auf das Modellieren von Herbstblättern, die Simulation der äußeren Einflüsse auf die Blattfarbe und die Veränderung der Blattform.

Für die realistische Simulation der Blattgeometrie wurden in der Vergangenheit bereits verschiedene Verfahren vorgestellt [44, 88, 56]. In [70] wurde eine Simulationsmethode für die Veränderung der Blattfarbe von Bäumen vorgestellt. Mochizuki et.al. [101] entwickeln ein virtuelles Herbstfarbtonsystem, das auf einem biologischen und fraktalen Modell basiert. Govaerts et al. [110] erforscht

Pigment Klasse	Gemischte Arten	Die Farbe
Porphyrin	Chlorophyll	Grün
Carotenoid	Carotene und Lycopene	Gelb, Orange, Rot
	Xanthophyll	Gelb
Flavonoid	Flavone	Gelb
	Flavonol	Gelb
	Anthocyanin	Rot, Blau, Lila, Magenta

Abbildung 8.1: Die Pigmente der Blätter.

die Steuerung der internen drei dimensionalen Struktur und Lichtdurchlässigkeit des Blattgewebes. Jede Zelle wird durch einen Lichtbrechungsindex und einen Absorptionskoeffizienten gekennzeichnet. Franzke und Deussen [77] präsentieren eine einfache und praktische Methode für das Rendering der Blätter und anderer lichtdurchlässiger Pflanzenteile. Baranowski und Rokne [34] stellen ein algorithmisches Reflexions- und Lichtdurchlässigkeitsmodell für das Pflanzengewebe vor. Wang et al. [58] entwickeln ein Framework für das Rendering von Pflanzenblättern in Echtzeit mit globaler Beleuchtung.

8.2 Biologische Hintergründe

Die Farbe eines Blattes resultiert aus der Kombination unterschiedlicher Pigmente (siehe Abbildung 8.1), die von der Pflanze produziert werden. Die Hauptpigmentklassen, die für die Blattfarbe verantwortlich sind, sind Porphyrine, Carotinoide und Flavonoide. Die Farbe, die wir wahrnehmen, hängt von der Menge dieser Pigmente ab. Chemische Interaktionen innerhalb der Pflanze beeinflussen die Blattfarbe, besonders die Reaktion auf Säure [1].

Anthocyanin-Pigmente, die den Pflanzen dunkelrote bis violette Farben verleihen, schützen vermutlich die Blätter von der Beschädigung durch Lichtstrahlung mittels direkter Abschirmung [28]. Durch die Absorption der Lichtstrahlung verringert das Anthocyanin die Beschädigung von Photosynthese und von Photooxidative. Anthocyanin neutralisiert auch schädigende freie Radikale. Beide Mechanismen dienen dazu, das leicht verletzliche Pflanzengewebe von Beschädigungen durch äußere Einflüsse zu schützen [28].

Die Interaktion zwischen Pflanzenfressern und Pflanzen ist ein sehr komplexes Gebiet. Pflanzenfresser beeinflussen die Pflanzen auf mehrere Arten: *i)* Durch den Einfluss auf die Nährstoffaufnahme und das Wachstum der Pflanzen einschließlich der Ausdehnung des Bereichs, in dem die Pflanzen wachsen, *ii)* Durch Einfluss auf die Anordnung, die Vielfalt, die Struktur und die Dynamik der Pflanzenpopulation. Für die Existenz von Pflanzenfressern müssen ausreichend viele Pflanzen vorhanden sein, die sie mit geeigneten Nährstoffen versorgen. Weiterhin müssen diese Pflanzenarten sein, die sich nicht gegen Pflanzenfresser schützen können.

In allen Wirbeltiergruppen gibt es pflanzenfressende Arten. Insekten sind die wichtigste Gruppe innerhalb der wirbellosen Tiere. Sie beeinflussen die Blattstruktur durch das Fressen, den Abbau, das Bohren, das Graben und das Saft-Saugen an den Blättern [33]. Wir simulieren hier die Prozesse der daraus resultierenden Veränderung der Blattform.

8.3 Simulation der Effekte

Die Simulation der äußeren Einflusseffekte wird in zwei Schritte unterteilt: Im ersten Schritt simuliert man die äußeren Effekte auf die Blattpigmente und im zweiten Schritt auf die Blattform. Um beide Verfahren zu implementieren, verwende ich eine Perlinische Rauschfunktion [2]. Nachfolgend beschreibe ich zuerst die Simulation der äußeren Effekte auf die Blattpigmente. Die Effekte auf die Blattform werden danach im Abschnitt 8.3.2 präsentiert.

8.3.1 Veränderung der Blattpigmente

Die Simulation der Veränderung der Blattpigmente, die durch intensives Tageslicht entstehen, involviert drei Schritte (siehe Abbildung 8.2). Zuerst wenden wir einen Bildfilter auf das eingescannte Blatt an, um die Ränder des Blattes zu

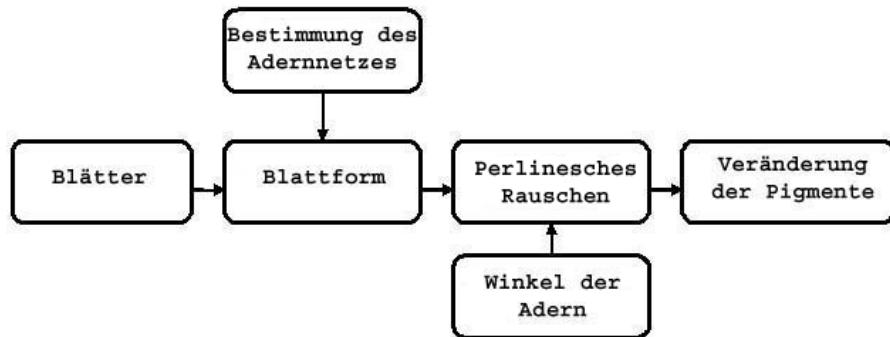


Abbildung 8.2: Schematische Veränderung der Blattpigmente.

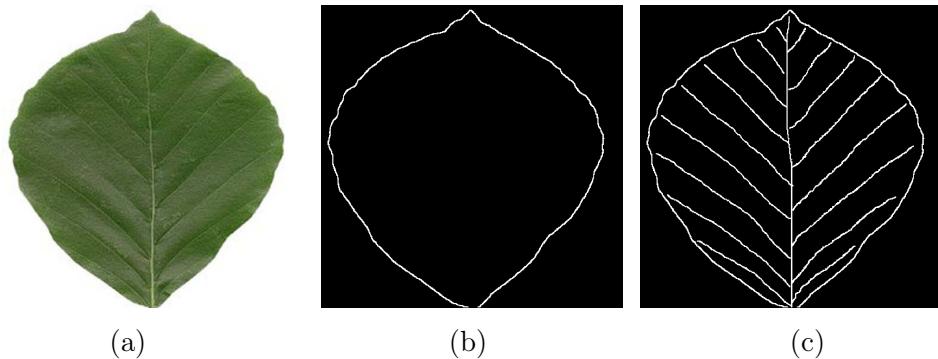


Abbildung 8.3: a) Ein gescanntes Blatt; b) Bestimmung des Blattrands; c) Bestimmung der Blattadern.

finden (siehe Abbildung 8.3 a und b). Dazu wurde ein sogenannter *Sobel Rand Detektor* (siehe dazu Anhang B) auf das eingescannte Blatt angewendet.

Danach wird ein interaktives Programm eingesetzt, um die Blattadern zu bestimmen (siehe Abbildung 8.3 c). Jede Ader hat eine Anfangskoordinate (X_1, Y_1) und eine Endkoordinate (X_2, Y_2) .

Nun wird der Veränderungsbereich des Blattes unter Berücksichtigung der Umgebungstemperatur bestimmt. Dafür wird für jede Blattader die Steigung in X- und Y-Koordinate berechnet. Nun wird das *eindimensionales Perlinschen Rauschen* (siehe dazu Anhang C) zwischen je zwei benachbarten Adern unter Berücksichtigung der Steigungen und der Einflussintensität der Umgebungstemperatur gezeichnet (siehe die Abbildung 8.4).

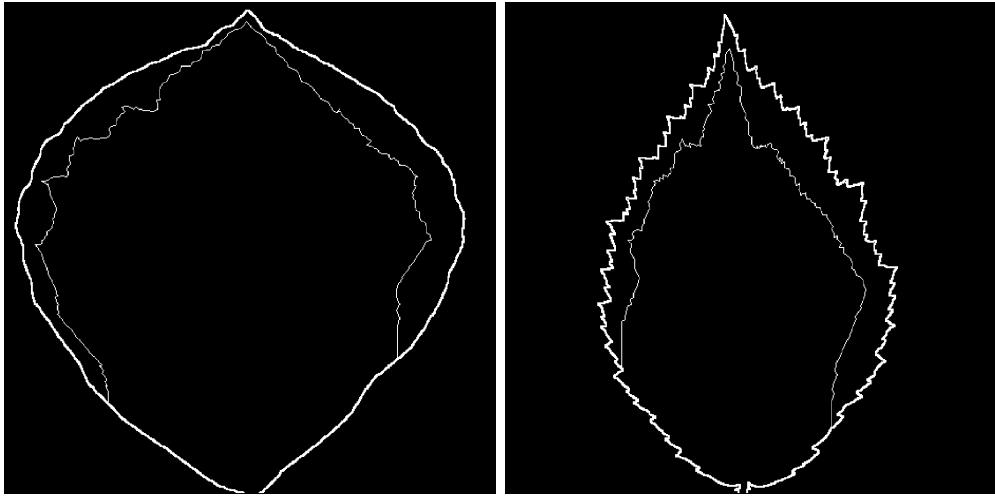


Abbildung 8.4: Berechnete Bereiche zur Simulation der Blattveränderung bei überstarken Lichtstrahlung.

$$X_{Neigung} = \frac{X_2 - X_1}{\sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2}}$$

$$Y_{Neigung} = \frac{Y_2 - Y_1}{\sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2}} \quad (8.1)$$

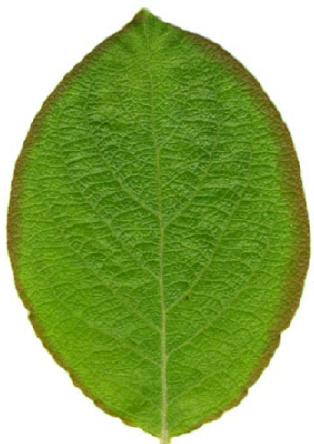
Schließlich werden das im Bereich zwischen Rauschsimulation und Blattrand liegende Pigment verändert (siehe die Abbildung 8.4). Durch intensives Tageslicht steigt die Anthocyanin-Produktion, und die Chlorophyll-Produktion sinkt [28]. Dadurch, ergibt sich, dass die rote Farbe (Anthocyanin Pigmente) steigt, und die grüne Farbe (Chlorophyll Pigmente) sinkt, wie in Abbildung 8.1 dargestellt ist. Die Veränderung der Anthocyanin- und Chlorophyll-Pigmente wird durch die Veränderung der Blattfarbe am Blattrand dargestellt. In den Abbildungen 8.5 und 8.6 wird die rote Farbe im Veränderungsbereich erhöht, und die grüne Farbe in Bezug auf Zeit abgesenkt, um die Veränderung in der Farbe des Blattrands, welche durch intensives Tageslicht, den Alterungsprozess des Blattes oder durch Nährstoffmangel verursacht wird, zu simulieren.

8.3.2 Veränderung der Blattform

Insekten und Würmer (Pflanzenfresser) verändern die Blattform, indem sie die frischen Blatteile fressen oder die Farbe bestimmte Blattbereiche verändern. In



(a)



(b)



(e)



(c)



(d)

Abbildung 8.5: Veränderungen der Randfarbe von Blättern.



(a)



(b)



(e)



(c)



(d)

Abbildung 8.6: Starke Veränderungen der Randfarbe von Blättern.

unserer Arbeit wurde ein interaktiver „Editor“ entwickelt, um den Änderungsprozess an der Blattform und an der Blattfarbe durch *Perlinsche Rauschfunktionen* zu simulieren. Das System kann in zwei Schritte gegliedert werden: 1. Feststellung des Bereichs, dessen Farbe verändert wird, oder der angefressen werden soll. 2. Eliminieren dieses Bereichs oder Ändern der Blattpigmente in diesem Bereich.

Der Prozess zur Bestimmung des beeinflussten Bereichs besteht aus: *i*) Definition des Mittelpunkts des Bereichs. *ii*) Erzeugung einer Anzahl von kreisförmigen Kernen mit kleinen stochastischen Verschiebungen zwischen dem Mittelpunkt und dem Kreisradius. *iii*) Begrenzung des Bereichs durch Anwendung einer Interpolationsmethode (siehe dazu Anhang C) zwischen jeden zwei Kernen. Der Kreisradius ist jeweils abhängig von der Art der Pflanzenfresser und Blätter. Jeder Pflanzenfresser beeinflusst die Blattform oder -Farbe durch seine eigene Ernährungs- oder Infektionsart, deshalb werden verschiedene Interpolationsmethoden verwendet.

Nachdem der Bereich festgestellt wurde, wird er entweder aus den Blättern entfernt, oder seine Farbe verändert. Die Form des Bereichs ist abhängig von der Pflanzenfresserart. Um die Farbe des Bereichs zu ändern, wird ein iterativer Algorithmus verwendet, der die Farbe graduell während der Simulation ändert.

In Abbildung 8.7 wird dargestellt, wie die Pigmente der betroffenen Blattbereiche durch die von Insekten verursachten Einflüsse verändert werden. Die Veränderung der Blattpigmente nimmt vielfältige Formen an, und ergibt dabei unterschiedliche Blattfarben, z.B. saugen einige Insekten aus den Blättern gewisse Nährstoffe aus, wohingegen andere Insekten sich auf den Blättern ansiedeln und hierdurch die Blätter schädigen. Folglich verändert sich die Blattfarbe in bestimmten Bereichen.

In Abbildung 8.8 wird eine Ernährungsmethode von Pflanzenfressern oder Insekten, die einen bestimmten Bereich aus dem Blatt fressen, visualisiert. Beispielsweise gibt es Maden, die sich von Blättern ernähren oder die ihre Nester mittels Blattscheiben aufbauen.

8.4 Ergebnisse

Ich habe ein System vorgestellt, in dem der Einfluss von Umweltfaktoren wie Temperaturen im Herbst, intensive Sonnenstrahlung oder der Mangel von Bodennährstoffen auf Blätter dargestellt wird. Zusätzlich visualisiert mein System die Veränderungen der Blattformen, die durch Pflanzenfresser wie Insekten



Abbildung 8.7: Einfluss von Insekternährung auf die Farbe verschiedener Blätter.



Abbildung 8.8: Einfluss von Wurmernährung auf die Form verschiedener Blätter.

oder Würmer auftreten. Ein Hauptvorteil meines Systems ist seine Flexibilität und einfache Steuerung. Dem System werden aktuelle Ökosystembeschreibungen vorgegeben und der Benutzer gibt interaktiv die notwendigen Parameter ein. Das System erstellt daraus die Blätter mit den entsprechenden Veränderungen.

Kapitel 9

Zusammenfassung

In dieser Arbeit habe ich ein Modell der botanischen Pflanzenkonkurrenz präsentiert, welches die Simulationen einiger botanischer Phänomene ermöglicht. Weiterhin wurden einige Probleme der Modellierung von Pflanzenpopulationen für die Bildsynthese beschrieben und bearbeitet. Ich habe Modelle des Populationswachstums erweitert, indem ich die Konkurrenz in symmetrische und asymmetrische Varianten unterteilt habe. Die Fähigkeit meines Modells zur effizienten Simulation wurde mit großen Pflanzenpopulationen getestet.

Ein anderer Beitrag dieser Arbeit ist die botanische Simulation verschiedener Konkurrenzarten zwischen Pflanzen. Diese Simulation kann verwendet werden, um die Lichtkonkurrenz nicht nur als asymmetrische Konkurrenz zu behandeln, sondern auch als symmetrische Konkurrenz am Rand des Einflussbereichs.

Die Verwendung der Wangschen Kachelmethode und verschiedener von mir entwickelter Verfeinerungsmethoden ermöglicht es, auch große Pflanzenpopulationen, die aus unterschiedlichen Pflanzenarten bestehen, natürlich und in der Echtzeit darzustellen. Die Kacheln wurden hierfür erweitert, um die verschiedenen Nährstoffintensitäten im Boden zu berücksichtigen.

Außerdem wurden die vier bisher in vorherigen Arbeiten behandelten Konkurrenzstände auf neun erweitert, um die Pflanzenkonkurrenz auch im Untergrund darzustellen. Mein Verfahren, die Konkurrenz zwischen den Pflanzenwurzelsystemen zu visualisieren, ermöglicht es, festzustellen, welche der konkurrierenden Pflanzen stärker wird. Je dichter das Wurzelsystem ist, desto stärker wächst die Pflanze.

Das Resultat dieser Beiträge ist ein kontrollierbares Pflanzenmodell, das auf botanischen Beobachtungen basiert. Bei der Simulation der botanischen und

biomechanischen Prozesse während der Entwicklung einer Population kann es eingesetzt werden, um effizient und hinreichend genau Wachstumsprozesse nachzubilden. Ich hoffe, hiermit einen Beitrag für die computergrafische Visualisierung komplexer Ökosysteme geleistet zu haben.

Anhang A

Überlappungsbereich zweier Pflanzen

Das Überlappungsbereich zwischen zwei Kreisen kann als die Summe zweier Kreissegmente berechnet werden [57]. Die Kreise haben die Mittelpunkte (x_i, y_i) und (x_j, y_j) , und die Radien $r_i = \sqrt{\frac{f_i}{\pi}}$ und $r_j = \sqrt{\frac{f_j}{\pi}}$. (siehe die Abbildung(A.1)).

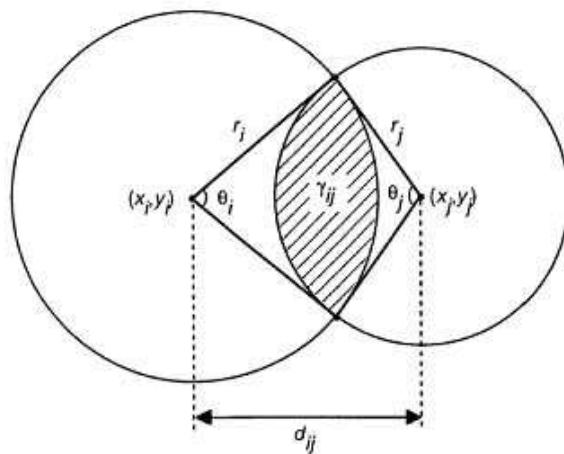


Abbildung A.1: Feststellung des Überlappungsbereich.

Der Abstand zwischen den Mittelpunkten der Kreise d_{ij} ist demnach:

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}. \quad (\text{A.1})$$

Die Winkel θ_i und θ_j werden durch die Linien definiert, die die Schnittpunkte und die Mittelpunkte der Kreise verbinden:

$$\theta_i = 2 \arccos \frac{r_i^2 + d_{ij}^2 - r_j^2}{2r_i d_{ij}} \quad (\text{A.2})$$

$$\theta_j = 2 \arccos \frac{r_j^2 + d_{ij}^2 - r_i^2}{2r_j d_{ij}}. \quad (\text{A.3})$$

Unter Annahme $r_i < r_j$, kann der Überlappungsbereich γ_{ij} ausgedrückt werden über

$$\gamma_{ij} = \begin{cases} 0 & : d_{ij} \geq r_i + r_j \\ r_i^2(\theta_i - \sin \theta_i) + r_j^2(\theta_j - \sin \theta_j) & : r_i < d_{ij} < r_i + r_j \\ f_i & : d_{ji} \leq r_i \end{cases} \quad (\text{A.4})$$

Der erste Fall dieser Gleichung entspricht der Situation, dass die Kreise nicht überlappen, der zweite Fall der Situation, dass die Kreise sich überlappen, und der dritte der Situation, bei der der kleine Kreis innerhalb des großen Kreises liegt.

Anhang B

Sobel Randdetektor

Der Sobelfilter ist ein klassischer Filter zur Erkennung von Kanten. Hier wurde er verwendet, um Randbereiche für die Veränderungen von Blättern zu finden.

Z_1	Z_2	Z_3
Z_4	Z_5	Z_6
Z_7	Z_8	Z_9

-1	-2	-1
0	0	0
1	2	1

$\mathbf{G_x}$

-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1

$\mathbf{G_y}$

Abbildung B.1: Sobelfilter-Masken zur Detektion von Gradienten.

Der Sobelfilter [91] benutzt die Maske aus Abbildung B.1, um die ersten Ableitungen in x- und y-Richtung zu approximieren. Somit wird eine Abschätzung für den Gradient am Mittelpunkt in einer Nachbarschaft berechnet:

$$\begin{aligned} g &= [G_x^2 + G_y^2]^{1/2} \\ &= \{(z_7 + 2z_8 + z_9) - (z_1 + 2z_2 + z_3)\}^2 \\ &\quad + \{(z_3 + 2z_6 + z_9) - (z_1 + 2z_4 + z_7)\}^2 \end{aligned} \tag{B.1}$$

Ein Pixel wird als Randpixel angenommen, wenn an dieser Position $g \geq T$ gilt, wobei T eine vom Programm vorgegebene Schwelle ist.

Anhang C

Perlinsche Rauschfunktion

Um eine Perlinsche Rauschfunktion [2] zu erzeugen, benötigt man eine Zufallsfolge und eine Interpolationsfunktion.

Die Zufallsfolge entsteht durch einen üblichen Zufallsgenerator und erzeugt Werte zwischen Null und Eins. Die Interpolationsfunktion erzeugt aus diesen Werten eine glatte Interpolante und macht es daher möglich, die entstehende Funktion an jeder Stelle abzuleiten.

Standardinterpolationsfunktionen interpolieren zwischen den Werten a und b, wobei der Parameter x zwischen 0 und 1 liegt und das Gewicht der Werte bestimmt. Wenn x gleich 0 ist, gibt die Funktion a zurück, für x gleich 1 den Wert b.

Die lineare Interpolation verwendet hierfür eine lineare Funktion, während die Cosinus-Interpolation eine Cosinusfunktion benutzt. Diese Methode erzeugt glattere Kurve als die lineare Interpolation, benötigt aber mehr Rechenzeit.

```
function CosinusInterpolante(a, b, x)
    ft = x * 3.1415927
    f = (1 - cos(ft)) * .5
    return a*(1-f) + b*f
end.
```

Andere Funktionen sind quadratische oder noch höherwertige Funktionen, die ebenfalls in der Lage sind, sehr glatte Interpolanten zu erzeugen.

Literaturverzeichnis

- [1] *Chemistry of Autumn Leaf Color*: <http://chemistry.about.com/library/weekly/aa082602a.htm>.
- [2] *Ken Perlin's Homepage*: <http://mrl.nyu.edu/perlin/>.
- [3] A.D.BELL: *The simulation of branching patterns in modular organisms*. Philos. Trans. Royal Society London, Ser. B 313, Seite 143–169, 1986.
- [4] A.H.HOND, P.B.TOMLINSON und J.B.FISHER: *Computer simulation of branching interaction and regulation by unequal flow rates in botanical trees*. American Journal of Botany 68, Seite 569–585, 1981.
- [5] A.LINDENMAYER: *Mathematical models for cellular interactions in development, I. Filaments with one-sided inputs*. Journal of theoretical biology, 18(3), Seiten 280–299, 1968.
- [6] A.LINDENMAYER: *Mathematical models for cellular interactions in development. II. Simple and branching filaments with two-sided inputs*. Journal of theoretical biology, 18(3), Seiten 300–315, 1968.
- [7] A.R.BERKOWITZ, C.D.CANHAM und V.R.KELLY: *Competition vs. facilitation of tree seedling growth and survival in early successional communities*. Ecology, Seiten 1156–1168, 1995.
- [8] A.R.WATKINSON: *Density-dependence in single species populations of plants*. Journal of Theoretical Biology, 83:345–357, 1980.
- [9] B.B.CASPER und R.B.JACKSON: *Plant competition underground*. Annual Review of Ecology and Systematics, 28:545–570, 1997.
- [10] B.BENES und E.ESPINOSA: *Using particles for 3D texture Sculpting*. The Journal of visualization and Computer Animation, 5:3–15, 2001.
- [11] B.B.MANDELBROT: *The fractal geometry of nature*. W. H. Freeman, San Francisco, 1982.

- [12] B.HOPKINS: *A new method for determining the type of distribution of plant individuals.* Annals of Botany, XVIII, Seite 213–226, 1954.
- [13] B.LANE und P.PRUSINKIEWICZ: *Generating Spatial Distributions for Multilevel Models of Plant Communities.* Proceedings of Graphics Interface, Seiten 69–80, 2002.
- [14] B.LINTERMANN und O.DEUSSEN: *A Modelling Method and User Interface for Creating Plants.* Computer Graphics Forum, 17(1), Seiten 73–82, 1998.
- [15] B.LINTERMANN und O.DEUSSEN: *Interactive Modelling of Plants.* IEEE Computer Graphics and Application Vol. 19 No. 1, Seiten 56–65, 1999.
- [16] B.MANDELBROT: *Fractals: Form, chance, and dimension (Unknown Binding).* W. H. Freeman, 1977.
- [17] C.DAMGAARD: *A test of asymmetric competition in plant monocultures using the maximum likelihood function of a simple growth model.* Ecological Modelling, 116:285–292, 1999.
- [18] C.DAMGAARD: *Quantifying the invasion probability of genetically modified.* Online Journal - URL:<http://www.bioline.org.br/by>, 7, 2001.
- [19] C.DAMGAARD und B.D.JENSEN: *Disease resistance in *Arabidopsis thaliana* increases the competitive ability and the predicted probability of long term ecological success under disease pressure.* Oikos, 98:459–466, 2002.
- [20] C.M.LIDDELL und D.HANSEN: *Visualizing complex biological interactions in the soil ecosystem.* The Journal of Visualization and Computer Animation 4, Seite 3–12, 1993.
- [21] C.W.REYNOLDS: *Flocks, herds, and schools: A distributed behavioral model.* Computer Graphics (SIGGRAPH 87 Proceedings), 21(4), Seite 25–34, 1987.
- [22] D.COHEN: *computer simulation of Biological pattern generation processes.* Nature, 216:246–248, 1967.
- [23] D.G.GREEN: *Simulated effects of fire, dispersal and spatial pattern on competition within forest mosaics.* Vegetatio, 82, Seiten 139–153, 1989.
- [24] D.G.GREEN: *Landscape, cataclysms and population explosions.* Mathematical and Computer Modelling, 13, Seiten 75–82, 1990.

- [25] D.H.DEUTSCHMAN, S.A.LEVIN, C.DEVINE und L.A.BUTTEL: *Scaling from trees to forests: Analysis of a complex simulation model.* Science online 277:<http://www.sciencemag.org/feature/data/deutschman/index.htm>, 1997.
- [26] D.R.FOWLER, P.PRUSINKIEWICZ und J.BATTJES: *A collision-based model of spiral phyllotaxis.* Computer Graphics (SIGGRAPH 92 Proceedings), 26(2), Seite 361–368, 1992.
- [27] D.TILMAN: *Dynamics and structure of plant communities.* Princeton University Press, Princeton, 1988.
- [28] D.W.LEE und K.S.GOULD: *Why Leaves Turn Red.* American Scientist, 90(6):524, 2002.
- [29] F.C.MICHAEL, S.JONATHAN, S.HELLER und O.DEUSSEN: *Wang Tiles for Image and Texture Generation.* Proceedings of ACM SIGGRAPH., Seiten 287 – 294, 2003.
- [30] F.JAMES und J.CAHILL: *Interaction between root and shoot competition vary among species.* Oikos, 99:101–112, 2002.
- [31] F.J.RICHARDS: *A flexible growth function for empirical use.* J. Exp. Botany, 10:290–300, 1959.
- [32] G.A.F.SEBER und C.J.WILD: *Nonlinear regression.* John Wiley and Sons, NewYork, 1989.
- [33] G.REICHELT und O.WILMANNS: *Vegetationsgeographie. Das geographische Seminar.* Braunschweig, 1973.
- [34] G.V.G.BARANOSKI und J.G.ROKNE: *An Algorithmic Reflectance and Transmittance Model for Plant Tissue.* Computer Graphics Forum, 23:331–340, 2004.
- [35] H.ABELSON und A.A.DISESSA: *Turtle geometry.* M.I.T. Press, Cambridge, 1982.
- [36] H.HONDA: *Description of the form of trees by the parameters of the tree-like body: effects of the branching angle and the branch length on the sample of the tree-like body.* Journal of theoretical biology, Seiten 331–338, 1971.
- [37] H.JONES: *Modelling of Growing Natural Forms.* Springer-Verlag, 2002.
- [38] H.WANG: *Proving theorems by pattern recognition II.* Bell Systems Technical Journal., 40:1–42, 1961.

- [39] H.WANG: *Games, logic, and computers.* Scientific American (November), Seite 98–106, 1965.
- [40] INSTITUTE, HOKKAIDO FORSTRY RESEARCH, KOSHUNAI, BIBAI und HOKKAIDO 079-01 JAPAN.: *Effect of Crown Symmetry on Size-Structure Dynamics of Plant Populations.* Annals of Botany, 79:631–641, 1997.
- [41] J.B.FISHER und H.HONDA: *Computer simulation of branching pattern and geometry in Terminalia (Combretaceae), a tropical tree.* Botanical Gazette 138, Seiten 377–384, 1977.
- [42] J.B.FISHER und H.HONDA: *Branch Geometry and Effective Leaf Area: A Study of Terminalia-Branching Pattern. 1. Theoretical Trees.* American Journal of Botany, Vol.66, No.6, Seiten 633–644, 1979.
- [43] J.BLOOMENTHAL: *A Representation for Botanical Trees using Density Distributions.* 1st Int'l Conf. on Engineering and Computer Graphics, Seiten 571–575, 1984.
- [44] J.BLOOMENTHAL: *Modeling the Mighty Maple.* Proceedings of SIGGRAPH, 3:305–311, 1985.
- [45] J.G.FRANCO-PIZANA, T.E.FULBRIGHT, D.T.GARDINER und A.R.TIPTON: *Shrub Emergence and Seedling Growth in Microenvironments Created by Prosopis glandulosa.* Journal of Vegetation Science, 7(2):257–264, 1996.
- [46] J.H.VANDERMEER: *The ecology of intercropping.* Cambridge University Press, Cambridge, 1989.
- [47] J.K.A.BLEASDALE und J.A.NELDER: *Plant populations and crop yield.* Nature 188, Seite 342, 1960.
- [48] J.L.HARPER: *Population Biology of Plants.* Academic Press, 1977.
- [49] J.MOLLER: *Lectures on Random Voronoi Tessellations.* Springer Verlag, 1994.
- [50] J.S.HANAN: *Parametric L-systems and their application to the modelling and visualization of plants.* PhD thesis, University of Regina, 1992.
- [51] K.CULIK: *An aperiodic set of 13 Wang tiles.* Discrete Mathematics, Seiten 245–251, 1996.

- [52] K.W.FLEISCHER, D.H.LAIDLAW, B.L.CURRIN und A.H.BARR: *Cellular texture generation.* generation. In SIGGRAPH 95 Conference Proceedings, Seite 239–248, 1995.
- [53] K.YODA, T.KIRA, H.OGAWA und K.HOZUMI: *Self-thinning in overcrowded pure stands under cultivated and natural conditions.* J. Biol. Osaka City Univ, 14, Seite 107–129, 1963.
- [54] L.GARCIA-BARRIOS, D.MAYER-FOULKES, M.FRANCO, G.URQUIDO-VASQUEZ und J.FRANCO-PEREZ: *Development and validation of a spatial explicit individual-based mixed crop growth model.* Bulletin of Mathematical Biology, 63:507–526., 2001.
- [55] L.G.FIRBANK und A.R.WATKINSON: *On the analysis of competition within twospecies mixtures of plants.* Journal of Applied Ecology 22, Seiten 503–517, 1985.
- [56] L.MÜNDERMANN, P.MACMURCHY, J.PIVOVAROV und P.PRUSINKIEWICZ: *Modeling lobed leaves.* Proceedings of Computer Graphics International, Seiten 60–65, 2003.
- [57] L.RADE und B.WESTERGREN: *Mathematics handbook for science and engineering. – Studentlitteratur, Lund.* 2001.
- [58] L.WANG, W.WANG, J.DORSEY, X.YANG, B.GUO und H.Y.SHUM: *Real-Time Rendering of Plant Leaves.* Proceedings of ACM SIGGRAPH, 24:712–719, 2005.
- [59] M.ALSWEIS und O.DEUSSEN: *Modeling and visualisation of symmetric and asymmetric plant competition.* Eurographics Workshop on Natural Phenomena., 2005.
- [60] M.ALSWEIS und O.DEUSSEN: *Modeling and Visualization of symmetric and asymmetric plant competition.* Natural Phenomena 2005. Eurographics Association in coorperation with ACM/SIGGRAPH., Seiten 83–88, 2005.
- [61] M.ALSWEIS und O.DEUSSEN: *Efficient simulation of vegetation using light and nutrition competition.* Simulation und Visualisierung 2006, Magdeburg., Seiten 83–88, 2006.
- [62] M.ALSWEIS und O.DEUSSEN: *Wang-Tiles for the Simulation and Visualization of Plant Competition.* LNCS, Advances in Computer Graphics, 2006.

- [63] M.ALSWEIS und O.DEUSSEN: *Extended Competition Rules for Interacting Plants*. International Conferences in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision, Seiten 1–8, 2007.
- [64] M.BEGON, J.L.HARPER und C.R.TOWNSEND: *Ecology individuals, populations and communities*. Black-well Science, 1996.
- [65] M.G.BULMER: *Theoretical Evolutionary Ecology*. Sunderland: Sinauer, 1994.
- [66] M.P.HASSEL, H.N.COMINS und R.M.MAY: *Spatial structure and chaos in insect population dynamics*. Nature, 353, Seiten 255–258, 1991.
- [67] M.REES, R.CONDIT, M.CRAWLEY, S.PACALA und D.TILMAN: *Long-term studies of vegetation dynamics*. Science, 293:650–655, 2001.
- [68] M.R.T.DALE: *Spatial Pattern Analysis in Plant Ecology*. Cambridge Studies in Ecology. Cambridge University Press, Cambridge, UK,, 1999.
- [69] N.CHIBA, K.OHSHIDA, K.MURAOKA, M.MIURA und N.A.SAITO: *Growth model having the abilities of growth-regulations for simulating visual nature of botanical trees*. Computers and Graphics 18,4, Seite 469–479, 1994.
- [70] N.CHIBA, K.OHSHIDA, K.MUROAKA und S.NOBUJI: *Visual Simulation of Leaf Arrangement and Autumn Colors*. The Journal of Visualization and Computer Animation, 7:79–93, 1996.
- [71] N.CHIBA, S.OHKAWA, K.MURAOKA und M.MIURA: *Visual simulation of botanical trees based on virtual heliotropism and dormancy break*. The Journal of Visualization and Computer Animation 5, Seite 3–15, 1994.
- [72] O.DEUSSEN und B.LINTERMANN: *Erzeugung komplexerer botanischer Objekte in der Computergraphik*. Informatik Spektrum, 1971.
- [73] O.DEUSSEN und B.LINTERMANN: *A Modelling Method and User Interface for Creating Plants*. Graphics Interface, Seiten 189–198, 1997.
- [74] O.DEUSSEN und B.LINTERMANN: *Digital design of nature computer generated plants and organics*. Springer Verlag, 2004.
- [75] O.DEUSSEN, P.HANRAHAN, B.LINTERMANN, R.MĚCH, M.PHARR und P.PRUSINKIEWICZ: *Realistic modeling and rendering of plant ecosystems*. In Proceedings of SIGGRAPH, Seite 275–286, 1998.

-
- [76] O.DEUSSEN, S.HILLER, C.W.A.M. VAN OVERVELD und T.STROTHOTTE: *Floating Points: A method for computing stipple drawings.* Computer Graphics Forum, Vol. 19(3) , Eurographics 2000 Conference Proceedings, Seiten 40–51, 2000.
 - [77] O.FRANZKE und O.DEUSSEN: *Accurate Graphical Representation of Plant Leaves.* International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization, and their Applications, 2003.
 - [78] P.GRIME: *Plant Strategies, Vegetation Processes, and Ecosystem Properties.* ISBN:0-471-49601-4, 2001.
 - [79] P.H.CROWLEY: *Dispersal and stability of predator-prey interactions.* The American Naturalist, 118, Seiten 673–701, 1981.
 - [80] P.HOGEWEG und B.HESPER: *A model study on biomorphological description.* In:Pattern recognition, Seiten 165–179, 1974.
 - [81] P.J.DARWEN und D.G.GREEN: *Viability of populations in a landscape.* Ecological Modelling, Volume 85, Number 2, Seiten 165–171, 1996.
 - [82] P.OPPENHEIMER: *Real time design and animation of fractal plants and trees.* SIGGRAPH Comput. Graph., 20:55–64, 1986.
 - [83] P.PRUSINKIEWICZ: *Graphical applications of L-systems.* In Proceedings of Graphics Interface '86 — Vision Interface '86, Seite 247–253, 1986.
 - [84] P.PRUSINKIEWICZ: *Applications of L-systems to computer imagery.* In H. Ehrig, M. Nagl, A. Rosenfeld, and G. Rozenberg, editors, *Graph grammars and their application to computer science; Third International Workshop.* Springer-Verlag, Berlin, Seite 534–548, 1987.
 - [85] P.PRUSINKIEWICZ und A.LINDENMAYER: *The algorithmic beauty of plants.* Springer-Verlag, New York, 1990.
 - [86] P.PRUSINKIEWICZ, A.LINDENMAYER und J.HANAN: *Developmental models of herbaceous plants for computer imagery purposes.* Proceedings of ACM SIGGRAPH, Seite 141–150, 1988.
 - [87] P.PRUSINKIEWICZ und J.HANAN: *Visualization of botanical structures and processes using parametric L-systems.* In D. Thalmann, editor, *Scientific Visualization and Graphics Simulation,* Seite 183–201, 1990.

- [88] P.PRUSINKIEWICZ, L.MUENDERMAN, R.KARWOWSKI und B.LANE: *The Use of Positional Information in the Modeling of Plants*. Proceedings of SIGGRAPH, Seiten 289–300, 2001.
- [89] P.PRUSINKIEWICZ, M.HAMMEL, R.MECH und J.HANAN: *The artificial life of plants*. ACM SIGGRAPH, Seiten 1–38, 1995.
- [90] P.PRUSINKIEWICZ, M.JAMES und R. MĚCH: *Synthetic topiary*. Proceedings of SIGGRAPH, Seiten 351–358, 1994.
- [91] R.C.GONZALEZ, R.E.WOODS und S.L.EDDINS: *Digital Image Processing Using MATLAB*. 2004.
- [92] R.FLOYD und L.STEINBERG: *An adaptive algorithm for spatial grayscale*. Proc. the Society for Information Display, 17 (2), Seiten 75–77, 1976.
- [93] R.GERARDO, W.TOM, G.ZHENYANG, Y.XIAOLONG, L.HONG und L.JONATHAN: *Root Gravitropism and Below-ground Competition among Neighbouring Plants: A Modelling Approach*. Annals of Botany, 88(5):929–940, 2001.
- [94] R.MĚCH und P.PRUSINKIEWICZ: *Visual models of plants interacting with their environment*. Proceedings of SIGGRAPH, Seiten 397–410, 1996.
- [95] R.V.SOLE und J.VALLS: *On structural stability and chaos in biological systems*. Journal of theoretical Biology, 155, Seiten 87–102, 1992.
- [96] S.AIKIO: *Competitive asymmetry, foraging area size and coexistence of annuals*. Oikos, 104:51–58, 2004.
- [97] S.A.LEVIN, B.GRENFELL, A.HASTINGS und A.S.PERELSON: *Mathematical and computational challenges in population biology and ecosystems science*. Science, 275:334–343, 1997.
- [98] S.BAUER, T.WYSZOMIRSKI, U.BERGER, H.HILDENBRANDT und V.GRIMM: *Asymmetric competition as a natural outcome of neighbour interactions among plants: results from the field-of-neighbourhood modelling approach*. Plant Ecology, 170:135–145, 2004.
- [99] S.BAUER, U.BERGER, H.HILDENBRANDT und V.GRIMM: *Cyclic dynamics in simulated plant populations*. Proc R Soc Lond B Biol Sci., 269(1508):2443–2450, 2002.
- [100] S.HILLER, O.DEUSSEN, A.KELLER: *Tiled blue noise samples*. VMV01, Stuttgart, November, 2001.

- [101] S.MOCHIZUKI, D.CAI, T.KOMIRI, H.KIMURA und R.HORI: *Virtual Autumn Coloring System Based on Biological and Fractal Model*. Proceedings of Ninth Pacific Conference on Computer Graphics and Applications, Seiten 348–354, 2001.
- [102] S.PACALA, C.CANHAM, J.SAPONARA, J.SILANDER, R.KOBE und E.RIBBENS: *Forest models defined by field measurements: Estimation, error analysis and dynamics*. Ecological Monographs, 66:1–44, 1996.
- [103] S.SCHWINNING und G.A.FOX: *Population dynamic consequences of competitive symmetry in annual plants*. Oikos, 72:422–432, 1995.
- [104] S.SCHWINNING und J.WEINER: *Mechanisms determining the degree of size asymmetry in competition among plants*. Oecologia, 113:447–455, 1998.
- [105] S.WOLFRAM: *Cellular automata as models of complexity*. Nature, 311, Seiten 419–424, 1984.
- [106] T.WYSZOMIRSKI, I.WYSZOMIRSKA und I.JARZYNA: *Simple mechanisms of size distributions dynamics in crowded and uncrowded virtual monocultures*. Ecological Modelling, 115:253–273, 1999.
- [107] U.BERGER und H.HILDENBRANDT: *A new approach to spatially explicit modelling of forest dynamics, ageing and neighbourhood competition of mangrove trees*. Ecological Modelling, 132:287–302, 2000.
- [108] V.CLAUSNITZER und J.HOPMANS: *Simultaneous modeling of transient three-dimensional root growth and soil water flow*. Plant and Soil 164, Seite 299–314, 1994.
- [109] W.T.REEVES und R.BLAU: *Approximate and probabilistic algorithms for shading and rendering structured particle systems*. Computer Graphics (SIGGRAPH 85 Proceedings), 19(3), Seite 313–322, 1985.
- [110] Y.M.GOVAERTS, S.JACQUEMOUD, M.M.VERSTRAETE und S.L.USTIN: *Three-dimensional radiation transfer modeling in a dicotyledon leaf*. Applied Optics, 35:6585–6598, 1996.