

■ fakultät für informatik

Bachelor-Arbeit

Space Colonization-gestützte
Generierung realitätskonformer
Vegetationsszenarien

Jana Jansen

17. Februar 2020

Gutachter:

Priv.-Doz. Dr. Frank Weichert

Prof. Dr. Heinrich Müller

Lehrstuhl Informatik VII
Computergraphik
TU Dortmund

Inhaltsverzeichnis

Mathematische Notation	1
1 Einleitung	3
1.1 Motivation	3
1.2 Struktur der Arbeit	5
2 Virtuelle Vegetation	7
2.1 Herausforderungen	7
2.2 Stand der Technik	8
2.2.1 Parametrisierte Generierung	8
2.2.2 Generierung mit dem Space Colonization Algorithmus	9
2.2.3 Modulare Generierung	10
2.3 Vorgehensweise	11
3 Generierung von Vegetationsszenarien	13
3.1 Einleitung	13
3.2 Skelett eines Baummodells	15
3.3 Punktfolge	16
3.3.1 Generierung der Punktfolge	16
3.3.2 Festlegung des Profils der Baumkrone	18
3.3.3 Einfluss der Attraction Points	20
3.4 Attraction Map	21
3.5 Generierung des Skeletts	23
3.5.1 Space Colonization	23
3.5.2 Nachbearbeitung	26
3.6 Überführung des Skeletts in ein graphisches Modell	34
3.6.1 Modellierung von Astsegmenten	34
3.6.2 Ergänzung des Modells um dekorative Komponenten	36
3.7 Ergebnisse der Generierung	37

4 Einflussfaktoren auf die Struktur von Pflanzen	39
4.1 Problematik	39
4.2 Erweiterung der Szenerie	41
4.3 Hindernisse	42
4.3.1 Modellierung von Hindernissen	42
4.3.2 Integration von Hindernissen	43
4.4 Lichtverhältnisse	45
4.4.1 Wachstum von Pflanzen durch Photosynthese	46
4.4.2 Lichtquellen	47
4.4.3 Verlauf und Modellierung der Sonne	47
4.4.4 Perzeption der Lichtverhältnisse und Phototropismus	51
4.4.5 Statische Lichtquellen	56
4.4.6 Dynamische Lichtquellen	59
5 Evaluierung	63
5.1 Evaluierungsszenarien	63
5.1.1 Szene A ohne Hindernisse	65
5.1.2 Szene B mit einem Hindernis	66
5.2 Auswertung	66
5.2.1 Neigung	68
5.2.2 Massenschwerpunkt	72
5.2.3 Optimierung der Lichtgewinnung	74
6 Zusammenfassung und Ausblick	79
6.1 Zusammenfassung	79
6.2 Ausblick	80
Abbildungsverzeichnis	84
Algorithmenverzeichnis	85
Literaturverzeichnis	87

Mathematische Notation

Notation	Bedeutung
\mathcal{M}	Menge \mathcal{M}
$ \mathcal{M} $	Betrag der Menge \mathcal{M}
$\mathfrak{P}(\mathcal{M})$	Potenzmenge der Menge \mathcal{M}
$G = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$	Graph G mit Knotenmenge \mathcal{V} und Kantenmenge \mathcal{E}
\mathbf{v}	Vektor $\mathbf{v} = (x, y, z)^T$
$\hat{\mathbf{v}}$	Betrag des Vektors \mathbf{v}
$\langle \mathbf{v} \rangle$	normierter Vektor $\langle \mathbf{v} \rangle = \mathbf{v}/\hat{\mathbf{v}}$
$ \mathbf{v} - \mathbf{w} $	Euklidische Distanz zwischen den Punkten \mathbf{v} und \mathbf{w}

1 Einleitung

1.1 Motivation

Vegetation bezeichnet die Gesamtheit der Pflanzen, die ein bestimmtes Gebiet bewachsen [7]. Ein Vegetationsszenario ist besonders durch vorkommende Bäume oder auch Büsche geprägt. Das liegt an ihrer Größe im Vergleich zu beispielsweise Blumen und Gräsern und an der Vielfalt ihrer Erscheinung. In dieser Arbeit werden deshalb Bäume als wesentlicher Teil der Vegetation betrachtet.

Urbane Gebiete können sich durch dunkle Asphaltflächen und Dächer, welche wenig Licht reflektieren, aufheizen, wodurch Smog begünstigt wird [1]. Bäume können durch Schattenwurf und die Absorption und Reflexion von Licht die Lufttemperatur senken, und durch Windschatten das Abkühlen von Gebäuden im Winter verringern. Durch diese regulierenden Effekte konnte in einer Untersuchung bei zwei Häusern eine Einsparung von 30% der Kühlkosten durch Schattenbäume festgestellt werden. Bäume produzieren Sauerstoff und verbrauchen CO₂ [32], was in industriellen und urbanen Gebieten ausgleichend wirken kann, und im Bezug auf den Klimawandel relevant ist [5]. Durch diese ökologischen und ökonomischen Vorteile für urbane



(a) Übersicht des Bauprojekts aus der Vogelperspektive.



(b) Detailansicht aus der Perspektive einer Person.

Abbildung 1.1: Bilder von dreidimensionalen Modellen eines Bauprojekts in einem urbanen Gebiet [8]. Ein landwirtschaftliches Grundstück wird bebaut, wobei ein Teil der Vegetation erhalten bleiben soll.

Gebiete sind Bäume relevant für die Städteplanung. Des Weiteren sorgt die Anwesenheit von Bäumen für eine Reduzierung von Stressfaktoren wie Lärm und steigert die Attraktivität des Gebiets und das Wohlbefinden von ansässigen Menschen [9]. Bei der Städteplanung werden dreidimensionale Modelle verwendet, die zum Beispiel Straßen, Gebäude und die Vegetation beinhalten [28]. Diese erleichtern, besonders bei einem hohen Grad an Realismus, die Visualisierung und helfen bei der Entscheidungsfindung. Dabei können in einem Modell zahlreiche Bäume vorkommen, sodass eine automatische Generierung, bei der die erzeugten Modelle bestenfalls an die Umgebung angepasst sind, von Vorteil wäre. Bei der Generierung sollten Modelle von verschiedenen Baumtypen und Größen erzeugbar sein, wodurch verschiedene Möglichkeiten ausprobiert und aus verschiedenen Perspektiven betrachtet werden können.

Dreidimensionale Modelle von Bäumen werden auch bei der Erstellung von Szenen für Videospiele oder auch Animationen benötigt, die Vegetation enthalten. Spiele mit offener Spielwelt und realistischem Grafikstil sind gefragt. So gehören beispielsweise *The Witcher 3: Wild Hunt*, *Grand Theft Auto V* und *Assassin's Creed Odyssey* zu den 24 meist gekauften Spielen 2019 auf der Plattform *Steam* [36]. Naturszenen mit Bäumen und Büschen in großen Spielwelten realitätskonform wirken zu lassen ist mit Aufwand verbunden. Für Realismus ist Abwechslung nötig, die erreicht werden kann, wenn Menschen Modelle individuell anfertigen und an die Szene anpassen, was allerdings Zeit kostet. Durch die Computergenerierung von Modellen kann deshalb Zeit und Geld gespart werden [33]. Angepasstheit eines Modells an eine Szene kann entscheidend sein, da auch ein an sich realistisch aussehendes Modell unrealistisch erscheint, wenn es in der Umgebung unpassend wirkt. Bei der Generierung sollen



Abbildung 1.2: Bäume und Büsche in einer Graslandschaft im Spiel *The Witcher 3: Wild Hunt* [31].

abwechslungsreiche, realistische Modelle von Bäumen erzeugt werden, die bestenfalls an Einflüsse ihrer Umgebung in der Szenerie angepasst sind. Dabei ist eine gute Kontrollierbarkeit erforderlich, um die Modelle genau auf die Ansprüche anzupassen und, im Vergleich zu der individuellen Erstellung durch Menschen, nicht zu viel Flexibilität zu verlieren.

1.2 Struktur der Arbeit

In Kapitel 2 wird zunächst die Problematik der Generierung von möglichst realistischen Modellen von Bäumen und Sträuchern thematisiert. Anschließend werden einige Verfahren vorgestellt, mit denen realistische Modelle generiert werden können. Dabei soll eine Methode gefunden werden, die unkompliziert um einige Umweltfaktoren erweiterbar ist, mit dem Ziel den Realismus der erzeugten Modelle zu erhöhen. Von diesen wird die Generierung mit dem *Space Colonization Algorithmus* [27] gewählt und in Kapitel 3 genauer vorgestellt. Die Grundstruktur eines Baumes, die aus Verzweigungen und den Positionen der Äste besteht, aber keine Informationen über das Erscheinungsbild, wie zum Beispiel die Dicke der Äste, liefert, wird als Skelett des Baumes bezeichnet. Die Generierung besteht aus zwei wesentlichen Schritten, der Generierung des Skeletts des Baumes und der Überführung dieses Skeletts in ein dreidimensionales graphisches Modell. Zunächst werden das Skelett und andere benötigte Strukturen vorgestellt und anschließend die beiden Schritte der Generierung. Als Abschluss werden beispielhaft zwei generierte Modelle gezeigt. Diese sehen bereits realistisch aus, sind jedoch nicht an ihre Umgebung angepasst.

In Kapitel 4 wird die Generierung des Skeletts so angepasst, dass die resultierenden Modelle an die Umgebung angepasst sind. Dafür wird zunächst ein Überblick über Umwelteinflüsse, die das Wachstum von Bäumen und Sträuchern beeinflussen können, gegeben. Für Hindernisse, die das Wachstum beeinflussen, und die Lichtverhältnisse in der Umgebung werden die Auswirkungen auf Pflanzen genauer untersucht und eine Modellierung eingeführt, mit der diese Umweltfaktoren in die Generierung integriert werden können.

In Kapitel 5 wird evaluiert, ob die Effekte der integrierten Umwelteinflüsse wie sie für reale Pflanzen beschrieben wurden, auch beim Modell auftreten und ob dadurch der Realismus gesteigert wurde. Dabei wird darauf eingegangen, in wie weit die Erweiterung der Generierung erfolgreich war und welche Kritikpunkte zukünftig weiter ausgebaut werden können.

2 Virtuelle Vegetation

In diesem Kapitel wird zuerst die Problematik der Generierung von möglichst realistischen Pflanzenmodellen thematisiert. Anschließend werden einige Methoden zur Erzeugung von Baummodellen vorgestellt, um den aktuellen Stand der Technik festzustellen.

2.1 Herausforderungen

Das Erscheinungsbild (Phänotyp) von Bäumen resultiert aus ihrer Entwicklung, die sowohl durch den Genotyp als auch durch zahlreiche Umweltfaktoren beeinflusst wird [25].

Ein Modell muss Charakteristiken von Bäumen aufweisen, um als solcher erkannt zu werden. Dabei ist die Struktur mit einem oder mehreren Stämmen und verzweigenden Ästen wichtig. Für Realismus in einer Szene ist es relevant Variation zu erzeugen, da mehrfach verwendete identische Modelle unnatürlich wirken. Diese Modelle individuell von Menschen erstellen zu lassen kann die benötigte Variation liefern, aber ist aufwändiger als eine automatische Generierung. Die Generierung muss genug Variation erzeugen, sodass die Baummodelle als Individuen erkennbar sind, ohne dabei an Realismus zu verlieren. Modelle von der gleichen Art Baum müssen auch als die gleiche Art identifizierbar sein. Zusätzlich muss die Generierung kontrollierbar sein, um nicht an Flexibilität zu verlieren und eine große Anzahl an verschiedenen Baumtypen darstellen zu können. Dabei sollte die Möglichkeit zur Kontrolle nicht zu komplex sein. In einer Szenerie eingebettet wirkt ein Modell besonders realistisch, wenn es nicht nur als realistisch wirkender Baum erkennbar ist, sondern zusätzlich an die Szenerie angepasst ist, sodass der Eindruck entsteht der Baum sei in dieser Umgebung gewachsen.

Für perfekten Realismus müsste das Wachstum eines Baumes mit allen inneren Vorgängen und Umweltfaktoren simuliert werden und wäre damit sehr komplex. Deshalb ist ein geeigneter Abstraktionsgrad nötig, bei dem die Generierung ansprechende Ergebnisse mit genug Variation erzeugt und dabei kontrollierbar bleibt.

2.2 Stand der Technik

Um eine Methode zu finden, bei der die Generierung von realistischen Modellen von Bäumen um Umwelteinflüsse erweiterbar ist, werden zunächst drei Methoden vorgestellt. Die parametrisierte Generierung in Unterabschnitt 2.2.1, die Generierung mit Hilfe des Space Colonization Algorithmus in Unterabschnitt 2.2.2, und die modulare Generierung in Unterabschnitt 2.2.3.

2.2.1 Parametrisierte Generierung

Bei der parametrisierten Generierung werden Modelle von Bäumen rekursiv durch das Hinzufügen von Ästen erzeugt, wobei struktureller Aufbau und Aussehen des Modells durch numerische Parameter bestimmt werden. [38].

Im ersten Schritt des rekursiven Verfahrens wird der Stamm erzeugt. Anschließend werden in jedem Schritt mehrere Äste mit den gleichen Parametern erzeugt, diese werden als Klone bezeichnet. Die hinzugefügten Äste sind Kinder der Äste aus dem vorherigen Rekursionsschritt und unterscheiden sich durch die Orientierung und Position mit der sie angebracht werden. Dabei entsteht eine regelmäßige Struktur der Verzweigungen. Einige Parameter, die zum Beispiel über Länge und Anzahl der Verzweigung bestimmen, unterscheiden sich bei jedem Schritt der Rekursion und können abhängig von den Parametern aus dem vorherigen Schritt definiert werden. Es gibt auch Parameter, die für jeden Rekursionsschritt angewendet werden, diese bestimmen zum Beispiel über die Färbung des Modells. Dadurch dass pro Rekur-



Abbildung 2.1: Ein Baum, der mit dem *Weber-Penn Tree* Plug-in für die *Helios API* erzeugt wurde [15]. Das Plug-in setzt die parametrisierte Generierung um.

sionsebene mehrere Äste hinzugefügt werden, sind in der Regel nur drei bis vier Rekursionsschritte nötig [38].

Durch die Parameter wird über die Anzahl der Verzweigungen, die Länge der Äste, die Auflösung des Modells und das gesamte Aussehen des Modells bestimmt. Dazu kommt das Vorkommen einiger Parameter für jede Ebene der Rekursion sodass man insgesamt auf über 50 Parameter kommen kann [38]. Bei den numerischen Parametern ist es nicht immer möglich intuitiv auf die Auswirkungen auf das Modell zu schließen.

Die parametrisierte Generierung wurde zum Beispiel in Java implementiert [37] und als Add-on für die Grafiksoftware *Blender* [11] und Plug-in für die *Helios API* [15] realisiert. Dabei werden ansprechende Ergebnisse erzeugt, bei denen jedoch die regelmäßige Grundstruktur erkennbar ist. Exemplarisch dafür ist in Abbildung 2.1 ein mit der Helios API erzeugtes Modell eines Olivenbaumes dargestellt.

2.2.2 Generierung mit dem Space Colonization Algorithmus

Der *Space Colonization Algorithmus* arbeitet nicht rekursiv, sondern erzeugt Modelle von Bäumen durch das sukzessive Hinzufügen von Astsegmenten als Modellierung des Wachstums [27]. Bei rekursiven Methoden zur Erzeugung von Bäumen entstehen regelmäßige Verzweigungsstrukturen, die zu Beginn der Entwicklung auch bei realen Bäumen entstehen. Bei größeren und älteren Bäumen ist diese Regelmäßigkeit jedoch nicht dominant, da das Wachstum durch die Umwelt beeinflusst wird und



Abbildung 2.2: Zwei Bäume die durch ihre Nähe um den verfügbaren Platz konkurrieren, generiert mit dem *Space Tree Pro* Plug-in für Blender [20].

deshalb unregelmäßig erfolgt. Eine zu große Regelmäßigkeit kann unnatürlich wirken, weshalb beim Space Colonization Algorithmus ein Umweltfaktor, der verfügbare Raum, als zentrales Kriterium für die Generierung verwendet wird. Zu Beginn wird ein Startpunkt für das Wachstum des Baumes festgelegt, der sich an der Basis des Stammes befindet. Iterativ werden Astsegmente hinzugefügt, sodass ein Stamm und Äste und dadurch Verzweigungen entstehen, sodass der Baum in den verfügbaren Platz hineinwächst. Dieser wird als Punktwolke modelliert, deren Punkte zufällig innerhalb des verfügbaren Raums erzeugt werden und eine anziehende Wirkung auf das Wachstum modellieren sollen. Hinzuzufügende Astsegmente werden deshalb vom bestehenden Modell aus in Richtung nahegelegener Punkte positioniert. Wenn von einem Astsegment eine bestimmte Distanz zu einem der Punkte unterschritten wird, dann wird dieser Punkt entfernt, da dieser Bereich des Raumes nicht mehr verfügbar ist. Zur Anpassung der Generierung werden, abgesehen von der Punktwolke, weniger als zehn Parameter benötigt, die zum Beispiel über die Dicke und Länge der Astsegmente bestimmen.

Mit dieser Methode werden realistische Ergebnisse erzielt, die auch unregelmäßig geformte Bäume modellieren können, bei einer überschaubaren Anzahl an Parametern. Die Baummodelle in Abbildung 2.2 konkurrieren durch ihre Nähe um den verfügbaren Raum, sodass die Punktwolken sich überschneiden beziehungsweise eine gemeinsame Punktwolke entsteht. Durch die Vorgehensweise des Algorithmus wird diese Konkurrenz automatisch berücksichtigt, wenn beide Modelle simultan generiert werden. Mit dieser Methode können Modelle erzeugt werden, die im Bezug auf andere Pflanzen an ihre Umgebung angepasst sind.

Die Abbildung ist Ergebnis einer Generierung mit dem Add-on *Space Tree Pro* für Blender, das die Generierung mit dem Space Colonization Algorithmus umsetzt [20]. Bei diesem wurde auch der Schatten als Umweltfaktor beachtet, indem an schattigen Stellen, die durch den Benutzer angegeben werden, weniger Punkte in der Punktwolke erzeugt werden.

2.2.3 Modulare Generierung

Die Modulare Generierung ist ein semi-automatisches Verfahren, bei dem ein Nutzer nach dem Baukastenprinzip vorgefertigte Stücke von Baumstämmen und Verzweigungen auswählen und im dreidimensionalen Raum positionieren kann, die dann automatisiert verbunden werden [41]. Die vorgefertigten Stücke müssen zuvor beispielsweise aus Scans von echten Bäumen als dreidimensionale Modelle rekonstruiert werden. Für das automatisierte Verbinden der Stücke werden Skalierung und Ori-

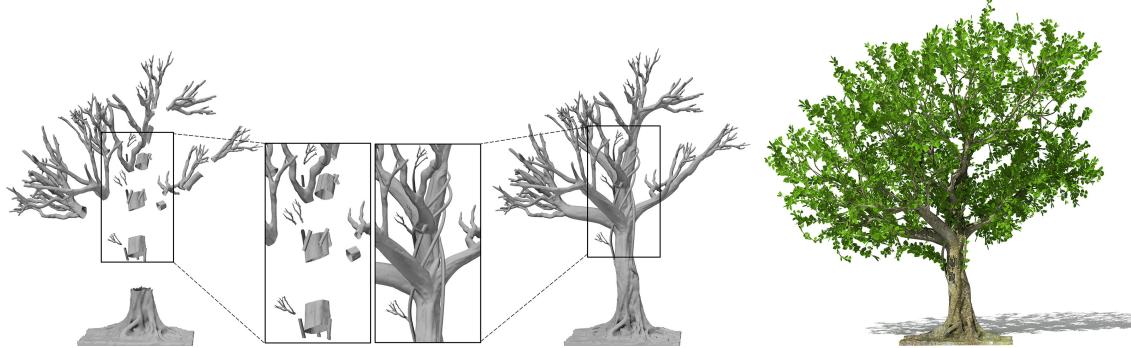


Abbildung 2.3: Grobe Darstellung des Ablaufs der modularen Generierung von Bäumen [41].

entierung ebenfalls automatisch angepasst. Auf der linken Seite in Abbildung 2.3 sind solche Stücke von Stamm und Ästen abgebildet, die beliebig im Raum platziert wurden. In der Mitte ist das Modell zu sehen, das durch die automatisierte Verbindung dieser Stücke entstanden ist. Die Oberfläche wird dabei an entstehende Verzweigungen und Unebenheiten der Stücke angepasst. Vom Benutzer können dann Bereiche bestimmt werden, in denen feines Astwerk und gegebenenfalls Blätter automatisiert hinzugefügt werden. Das geschieht in Anlehnung an den Space Colonization Algorithmus, indem im markierten Bereich Punkte erzeugt werden, zu denen Zweige wachsen. Das fertige Modell wird mit einer Textur versehen, die ebenfalls von realen Bäumen abgescannt wurde.

Mit dieser Methode ist es möglich unregelmäßig geformte Bäume zu erzeugen, die an ihre Umgebung angepasst sind. Dafür ist jedoch die Eingabe eines Menschen erforderlich, und die Vielfalt und Qualität wird durch die vorliegenden Stücke bestimmt.

2.3 Vorgehensweise

Von den vorgestellten Verfahren wird die Generierung mit dem Space Colonization Algorithmus für das weitere Vorgehen verwendet. Durch die Möglichkeit auch unregelmäßig aufgebaute Bäume zu generieren sind vielfältige und realistische Modelle möglich. Die Generierung wird durch wenige Parameter gesteuert und läuft dann automatisch ab. In Kapitel 3 wird der Ablauf der Generierung genauer vorgestellt. Die erzeugten Modelle sind, im Bezug auf benachbarte Bäume, bereits an die Umgebung angepasst. In diese Arbeit sollen andere Hindernisse die nicht gleichzeitig generiert werden, wie zum Beispiel Gebäude, ebenfalls in die Generierung eingebracht werden (vgl. Kapitel 4). Da der verfügbare Platz das Leitkriterium der Generierung ist, ist diese Erweiterung unkompliziert und wurde bereits bei der Vorsteilung des

Verfahrens als Möglichkeit genannt [27]. Durch die Ähnlichkeit zu einer Wachstums-Simulation ist das Verfahren dafür geeignet weitere Umweltfaktoren miteinzubeziehen. Der Schatten wurde in einer Anwendungen des Verfahrens bereits berücksichtigt. In Kapitel 4 werden die Auswirkungen der Lichtverhältnisse auf das Wachstum genauer betrachtet und mit einer anderen Herangehensweise in die Generierung integriert.

3 Generierung von Vegetationsszenarien

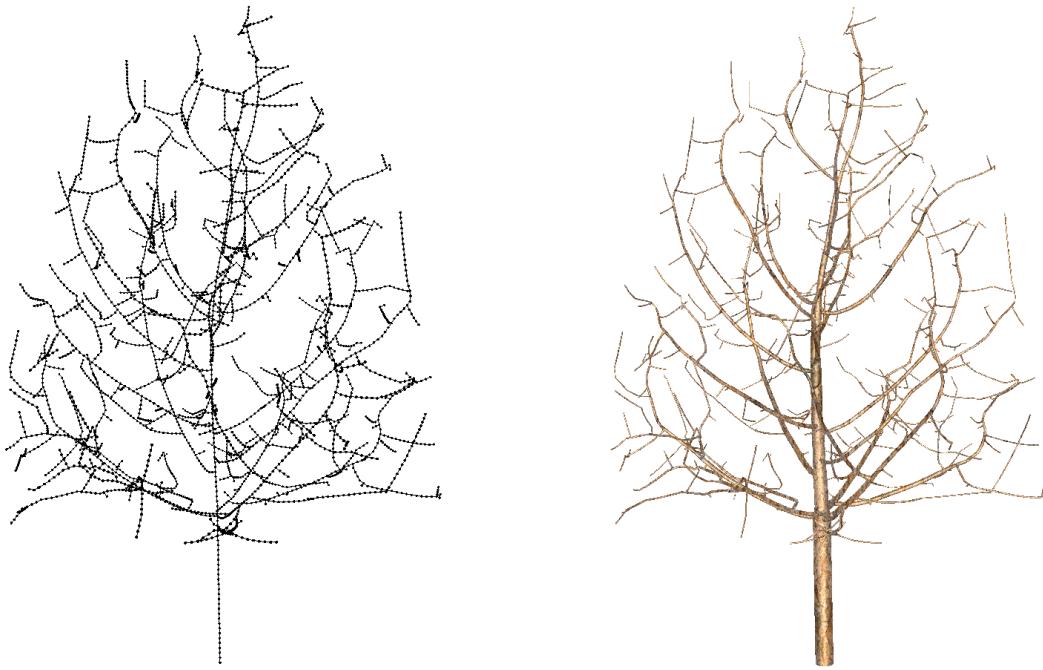
In Kapitel 2 wurden Techniken vorgestellt, mit denen dreidimensionale graphische Modelle von Pflanzen generiert werden können. In diesem Kapitel wird von den vorgestellten Verfahren die Generierung mit Hilfe des *Space Colonization Algorithmus* genauer erläutert. In Abschnitt 3.1 wird ein grober Überblick über das vorgestellte Verfahren zur Generierung gegeben. Dann werden zunächst die für den Prozess benötigten Strukturen vorgestellt. Diese Strukturen sind das Skelett des Baumes (vgl. Abschnitt 3.2), eine Punktwolke (vgl. Abschnitt 3.3) und die Attraction Map (vgl. Abschnitt 3.4). In Abschnitt 3.5 wird die Generierung der Grundstruktur von Bäumen vorgestellt. Danach wird in Abschnitt 3.6 erläutert, wie die Grundstruktur in ein graphisches Modell überführt wird. Abschließend werden in Abschnitt 3.7 exemplarisch zwei Modelle vorgestellt.

3.1 Einleitung

Das in diesem Kapitel vorgestellte Verfahren zur Generierung von Pflanzenmodellen besteht im Wesentlichen aus zwei Schritten.

Im ersten Schritt wird ein Baum als Datenstruktur mit Hilfe des Space Colonization Algorithmus generiert [27]. Diese Datenstruktur liefert Informationen über den Aufbau des Baumes, also die Position und Länge der Äste und wie diese verbunden sind, ohne Informationen über das graphische Erscheinungsbild zu liefern. Es handelt sich dabei um einen Graph G , dessen Knoten Punkte im \mathbb{R}^3 sind, und dessen Kanten kurze Segmente von Ästen oder dem Stamm repräsentieren. Wie in Abbildung 3.1(a) abgebildet, bildet G das Grundgerüst des Baumes und wird deshalb auch als *Skelett* bezeichnet.

Zu Beginn der Generierung besteht der Baum aus nur einem Knoten, der genau dem Punkt am Übergang vom Wurzelsystem zum Sprosssystem entspricht. Das Skelett wird, angelehnt an das Wachstum von realen Pflanzen, vom Stamm an zu den äu-



(a) Ein Baumskeletts, welches mit dem Space Colonization Algorithmus erzeugt wurde. Knoten sind als Kreise und Kanten als Linien dargestellt.

(b) Das graphische Modell eines Baumes, das aus dem Baumskelett aus Abbildung (a) erzeugt wurde.

Abbildung 3.1: Darstellung eines Skeletts, das mit dem Space Colonization Algorithmus generiert wurde und eines graphischen Baummodells, das aus diesem Skelett erzeugt wurde. Die in dieser Arbeit gezeigten Modelle wurden mit einer Baumrinden-Textur gerendert [34].

ßersten Spitzen generiert, indem sukzessiv weitere Segmente hinzugefügt werden, sodass Äste und Verzweigungen entstehen. Dabei wächst der Baum dem verfügbaren Platz entgegen, welcher durch eine Punktfolge modelliert wird. Die Punktfolge \mathcal{P} approximiert den Raum, den die Baumkrone des finalen Baummodells einnehmen soll. Da der verfügbare Platz im übertragenden Sinne eine anziehende Wirkung auf das Wachstum des Baumes hat, werden die Punkte der Punktfolge als *Attraction Points* bezeichnet. In Abbildung 3.1(a) ist exemplarisch ein Baumskelett dargestellt.

Im zweiten Schritt der Generierung wird das resultierende Skelett des Baumes in ein graphisches Modell, wie dargestellt in Abbildung 3.1(b), überführt [27].

Die Koordinaten aller Punkte in dieser Arbeit werden für ein rechtshändiges, kartesisches Koordinatensystem angegeben. Dabei wird die vertikale Achse als die y-Achse bezeichnet.

3.2 Skelett eines Baummodells

Das Skelett des Baumes beschreibt die Struktur der Verzweigungen des Baumes [27]. Ein Baum ist in der Graphentheorie ein zusammenhängender, kreisfreier Graph [6]. Die Kanten des Baumes sind gerichtet und es gibt einen Knoten, von dem aus es genau einen Pfad zu jedem anderen Knoten gibt. Diesen Knoten bezeichnet man als die Wurzel des Baumes. Das Skelett des Baumes wird durch einen endlichen Baum

$$G = (\mathcal{V}, \mathcal{E}) \quad (3.1)$$

modelliert, wobei \mathcal{V} die Menge der Knoten und \mathcal{E} die Menge der Kanten ist. Die Knoten sind dabei Ortsvektoren im \mathbb{R}^3 und der Wurzelknoten $\mathbf{v}_0 \in \mathcal{V}$ ist, sofern nicht anders erwähnt, der Ortsvektor $(0, 0, 0)^T$.

Die Anzahl der direkten Nachfolger eines Knotens \mathbf{v}_i wird als der Ausgangsgrad $o(\mathbf{v}_i)$ bezeichnet. Ein Knoten \mathbf{v}'_i ist direkter Nachfolger von \mathbf{v}_i , falls gilt $(\mathbf{v}_i, \mathbf{v}'_i) \in \mathcal{E}$, sodass

$$\mathcal{N}(\mathbf{v}_i) = \{\mathbf{v}'_i \mid (\mathbf{v}_i, \mathbf{v}'_i) \in \mathcal{E}\} \quad (3.2)$$

die Menge der direkten Nachfolger von \mathbf{v}_i bestimmt. Daraus ergibt sich der Ausgangsgrad

$$o(\mathbf{v}_i) = |\mathcal{N}(\mathbf{v}_i)|. \quad (3.3)$$

Eine graphische Darstellung des Baumskeletts ist in Abbildung 3.1(a) dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass das Skelett den strukturellen Aufbau beschreibt, ohne Informationen über das Erscheinungsbild zu liefern. Es beschreibt Verzweigungen und die Positionen der Äste, aber zum Beispiel nicht die Textur oder die Dicke der Äste.

Ein Teilabschnitt

$$G' = (\mathcal{V}' \subseteq \mathcal{V}, \mathcal{E}' \subseteq \mathcal{E}) \quad (3.4)$$

von G , der ebenfalls ein gewurzelter Baum ist wird bezeichnet als ein *Ast*, falls die Bedingungen 3.5 und 3.6 erfüllt sind.

Sei $l = |\mathcal{V}'|$ die Anzahl der Knoten, dann gibt es eine Aneinanderreihung der Knoten aus \mathcal{V}' , sodass gilt

$$\forall \mathbf{v}_i \in \mathcal{V}' (1 \leq i \leq l - 1) \Rightarrow e_i = (\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_{i+1}) \in \mathcal{E}' \quad (3.5)$$

und

$$o(\mathbf{v}_i) = 1 \quad , \text{ für } 1 < i < l \quad (3.6a)$$

$$o(\mathbf{v}_i) \neq 1 \quad , \text{ für } i = 1 \vee i = l. \quad (3.6b)$$

Die Bedingung 3.6b muss für $i = 1$ nicht erfüllt werden, falls $\mathbf{v}_0 \in \mathcal{V}'$, da der Startknoten eine Ausnahme bildet und zu einem Ast gehört, auch wenn er genau einen direkten Nachfolger hat.

Wenn gilt $o(\mathbf{v}_l) = 0$, dann hat \mathbf{v}_l keine Kindknoten und modelliert eine Astspitze des Baumes. Wenn $o(\mathbf{v}_l) \geq 1$, dann hat \mathbf{v}_l mehr als einen direkten Nachfolger und modelliert somit eine Verzweigung des Baumes. Dann ist \mathbf{v}_l ebenfalls Teil von $o(\mathbf{v}_l)$ anderen Ästen.

3.3 Punktwolke

Für die prozedurale Generierung des Baumskeletts wird eine Struktur benötigt, mit der der Raum, in dem sich beim fertigen Modell die Krone des Baumes befinden soll angenähert werden kann [27].

Dafür wird eine Punktwolke \mathcal{P} verwendet, welche formal eine Menge von Attraction Points $\mathbf{p}_k \in \mathbb{R}^3$ ist. Der Raum wird durch einen Rotationskörper R beschrieben [22]. Die Rotationsachse von R wird repräsentiert durch den Vektor $\mathbf{r}_a = (0, 1, 0)^T$ und einen Punkt \mathbf{p}_a , der dem Punkt des Wurzelknoten \mathbf{v}_0 des Skeletts entspricht. Die Achse entspricht dann also der Gerade

$$g_a = \mathbf{p}_a + s \cdot \mathbf{r}_a. \quad (3.7)$$

Im Standardfall entspricht \mathbf{v}_0 dem Nullvektor und die Rotationsachse somit der y-Achse des in dieser Arbeit verwendeten Koordinatensystems.

Die erzeugende Kurve von \mathcal{K} wird modelliert durch eine Funktion $f(y) = x$.

3.3.1 Generierung der Punktwolke

Die Punktwolke wird mit Punkten mit zufälligen Koordinaten gefüllt, die innerhalb des Rotationskörpers R liegen [27]. Ob ein Punkt innerhalb oder außerhalb von R liegt kann mit Hilfe der Funktion f überprüft werden.

Ein Punkt \mathbf{p}_k liegt innerhalb von R , wenn der Abstand

$$d_k = |(x_a, z_a)^T - (x_k, z_k)^T| \quad (3.8)$$

zur Drehachse, die senkrecht durch den Punkt \mathbf{p}_a verläuft, kleiner ist als der Radius $d_{R,k}$ von R an der Höhe y_k .

Da die Drehachse wegen des Vektors \mathbf{r}_a immer parallel zur y-Achse ist, wird bei der Berechnung die y-Komponente nicht beachtet, sondern nur zweidimensionale Koordinaten bestehend aus der x- und der z-Komponente verwendet.

Bei der Betrachtung von rotationssymmetrischen Körpern muss bei der Berechnung des Radius $d_{R,k}$ an einer bestimmten Höhe der Winkel nicht beachtet werden. Für die Berechnung kann also $f(y)$ verwendet werden und der Radius entspricht dem Abstand zwischen der Drehachse und dem Funktionswert $f(y_k)$ (vgl. Gleichung 3.9).

Als Grundlage für die Generierung kann auch ein nicht rotationssymmetrischer Körper verwendet werden [27]. Dafür wird statt der Funktion f eine Menge von Funktionen $\mathcal{F} = \{f_{\varphi_1}, \dots, f_{\varphi_n}\}$ mit $n \geq 1$ Elementen verwendet, für die jeweils ein Winkel φ_j angegeben ist, an welchem sie für den Körper R als erzeugende Kurve vorliegen. Eine Funktion am Winkel φ_j wird bezeichnet als f_{φ_j} . Bei allen Winkeln, für die keine Funktion $f_{\varphi_j} \in \mathcal{F}$ existiert, wird eine Interpolation der Funktion mit dem nächstgrößeren und der Funktion mit dem nächstkleineren Winkel verwendet. Bei einem nicht rotationssymmetrischen Körper muss bei der Berechnung von $d_{R,k}$ der Winkel φ_k , an dem der Punkt \mathbf{p}_k in R liegt berücksichtigt werden, sodass $d_{R,k}$ dem Abstand zwischen der Rotationsachse und der Interpolation am Winkel φ_k an der Höhe y_k entspricht.

Daraus ergibt sich insgesamt die Berechnung von

$$d_{R,k} = \begin{cases} |f(y_k) - x_a| & , \text{ wenn } K \text{ rotationssymmetrisch} \\ |f_{\varphi_k}(y_k) - x_a| & , \text{ sonst.} \end{cases} \quad (3.9)$$

In dieser Arbeit wurden ausschließlich rotationssymmetrische Körper für die Generierung verwendet.

Zusammengefasst wird das durch die Funktion

$$g(\mathbf{p}_k) = \begin{cases} 1 & , \text{ wenn } d_k \leq d_{R,k} \\ 0 & , \text{ sonst} \end{cases}, \quad (3.10)$$

wobei \mathbf{p}_k zur Punktfolge hinzugefügt wird wenn gilt $g(\mathbf{p}_k) = 1$.

3.3.2 Festlegung des Profils der Baumkrone

Mit der Funktion $f(y) = x$ wird das Profil der Baumkrone definiert [27]. Sie wird verwendet um den Abstand von der Drehachse zur Oberfläche von R zu messen und so zu testen, ob ein Punkt innerhalb oder außerhalb von R liegt.

Es wird eine Methode benötigt mit der eine Funktion flexibel so definiert werden kann, dass verschiedene Formen von Baumkronen dargestellt werden können. Dafür wird ein Querschnitt der gewünschten Form der Baumkrone betrachtet, der an der Mittelachse halbiert wird. An einer der Hälften werden markante Punkte, wie zum Beispiel der Beginn, die breiteste Stelle oder die Spitze der Baumkrone bestimmt. Die Funktion soll eine Kurve erzeugen, die durch alle markanten Punkte verläuft und optisch ansprechend ist.

Eine Möglichkeit dafür eine Kurve zu erhalten, die durch alle Punkte verläuft ist die Approximation mit einem Polynom. Dabei kann, abhängig von der Anzahl der Punkte, ein Polynom mit einem hohen Grad notwendig sein, bei dem es zwischen den markanten Punkten zu Schwingungen kommt, die optisch störend sind [4].

Abhilfe davon können *Splines*, Funktionen, die abschnittsweise aus Polynomen bestehen, schaffen [4]. Für die einzelnen Abschnitte wird ein maximaler Grad für die Polynome festgelegt und, da diese nur ein Segment zwischen zwei Knoten darstellen, wird kein hoher Grad benötigt und es kommt auch nicht zu ungewollten Schwingungen.

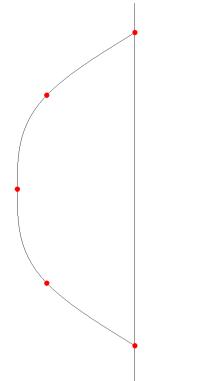
Sei \mathcal{S} eine Menge von m markanten Punkten im \mathbb{R}^2 mit den Elementen $\mathbf{s}_u = (x_u, y_u)^T$ und es gilt $y_1 < y_2 < \dots < y_m$. Zwischen zwei benachbarten Punkten \mathbf{s}_u und \mathbf{s}_{u+1} existiert ein Segment, das durch die Funktion f_u modelliert wird. Insgesamt beschreibt

$$f(y) = \begin{cases} f_1 & , \text{ für } y \in [y_1, y_2] \\ f_2 & , \text{ für } y \in [y_2, y_3] \\ \dots & \\ f_{m-1} & , \text{ für } y \in [y_{m-1}, y_m] \end{cases} \quad (3.11)$$

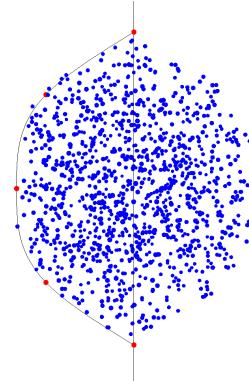
eine Kurve, die vom Startpunkt \mathbf{s}_1 bis zum Endpunkt \mathbf{s}_m durch alle markanten Punkte aus \mathcal{S} verläuft.

Bei allen vorliegenden Beispielen wurden kubische Splines verwendet, deren Funktionen für die Abschnitte die Form

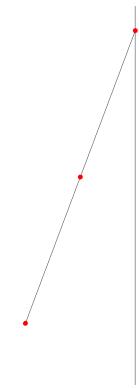
$$f_u(y) = a_u + b_u(y - y_u) + c_u(x - x_u)^2 + d_u(x - x_u)^3 \quad (3.12)$$



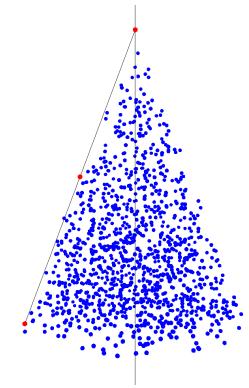
(a) Die markanten Punkte der Baumkrone sind so gewählt, dass durch f eine Kurve entsteht, die von der Mittellachse des Baumes, über die breiteste Stelle zur Spitze verläuft.



(b) Eine Punktfolke, die mit der Funktion f aus Abbildung (a) generiert wurde. Die Krone hat eine ovale Form.



(c) Hier wurden die markanten Punkte so gewählt, dass der Funktionsgraph von f einer geraden Strecke entspricht.



(d) Eine Punktfolke, die mit der Funktion f aus Abbildung (c) generiert wurde. Durch die Form des Funktionsgraphen von f entsteht eine Kegelform.

Abbildung 3.2: Einfluss der Wahl von f auf die Form der Punktfolke.

Markante Punkte der Baumkrone sind dargestellt als rote Punkte. Durch sie verläuft der Graph einer Funktion f , die mit diesen Punkten berechnet wurde, dargestellt als schwarze Linie. Die Punkte der Punktfolke werden als blaue Punkte dargestellt.

haben [4]. Die Funktion f muss außerdem folgende Bedingungen erfüllen:

$$f_u(y_u) = x_u \text{ und } f_u(y_{u+1}) = x_{u+1}, \text{ für } u \in [0, 1, \dots, n - 1] \quad (3.13a)$$

$$f_{u+1}(y_{u+1}) = f_i(y_{u+1}), \text{ für } u \in [0, 1, \dots, m - 2] \quad (3.13b)$$

$$f'_{u+1}(y_{u+1}) = f'_i(y_{u+1}), \text{ für } u \in [0, 1, \dots, m - 2] \quad (3.13c)$$

$$f''_{u+1}(y_{u+1}) = f''_i(y_{u+1}), \text{ für } u \in [0, 1, \dots, m - 2] \quad (3.13d)$$

$$f''(y_0) = f''(y_m) = 0. \quad (3.13e)$$

Bedingung 3.13a sorgt dafür, dass die Kurve durch alle gegebenen Punkte aus \mathcal{S} verläuft. Durch die Bedingungen 3.13b bis 3.13d sind die Übergänge zwischen den Abschnitten fließend, ohne sichtbare Kanten. Die Randpunkte s_1 und s_m gehören jeweils nur zu einem Segment, deshalb gibt es für sie die Bedingung 3.13e.

Die Funktion f hat pro Segment 4 Unbekannte, bei m Punkten also $4(m - 1)$. Mit den Bedingungen aus den Gleichungen 3.13 lassen sich genug Gleichungen aufstellen, um das Problem mit einem Gleichungssystem eindeutig zu lösen [4].

In Abbildung 3.2 ist anhand von zwei Beispielen zu sehen, wie die Wahl der Funktion f die Punktwolke beeinflusst. Die Kurve von f wird bestimmt durch die Menge der markanten Punkte. In Abbildung 3.2(a) und 3.2(b) wurden die Punkte so gewählt, dass eine runde Form der Krone erzielt wird, während in Abbildung 3.2(c) und 3.2(d) durch f eine kegelförmige Punktwolke generiert wird. Da die markanten Punkte beliebig gewählt werden können, ist die Form des Baumes flexibel bestimmbar. Durch Kombination verschiedener Punktwolken, durch Mengenoperatoren, wie Vereinigung oder Schnitt, sind noch komplexere Formen für die Krone möglich [27].

3.3.3 Einfluss der Attraction Points

Die Punktwolke bestimmt nicht nur über die äußere Form der Baumkrone, sondern auch über die Verteilung und Anzahl der Äste innerhalb der Krone.

Die Verteilung der Äste wird dabei durch die Verteilung der Punkte in \mathcal{P} bestimmt [27]. Ein Beispiel für diesen Einfluss ist in Abbildung 3.3 dargestellt.

Eine gleichmäßige Verteilung der Attraction Points führt auch zu einer gleichmäßigen Dichte der Baumkrone wie in Abbildung 3.3(a). In Abbildung 3.3(b) wurde das Modell mit denselben Parametern generiert, außer dass 90% der Punkte in den äußeren 15% Prozent vom Rotationskörper R platziert wurden. Dadurch ergibt sich auch eine andere Verteilung der Äste im Modell. Im Inneren der Baumkrone sind nur wenige, dafür größere Äste zu sehen, während sich am Rand der Baumkrone



(a) Ein Baum, der mit einer Punktfolge \mathcal{P} mit gleichmäßig innerhalb von R positionierten Attraction Points generiert wurde.

(b) Ein Baum der mit einer Punktfolge \mathcal{P} generiert wurde, bei der sich 90% der Punkte in den äußeren 15% von R befinden.

Abbildung 3.3: Vergleich von zwei Bäumen die mit dem beschriebenen Verfahren generiert wurden. Der einzige Unterschied bei der Generierung war die Verteilung der Punkte innerhalb der Punktfolge \mathcal{P} .

zahlreiche feinere Äste befinden.

Wenn bei der Generierung ein realer Typ Baum nachempfunden werden soll, kann die Verteilung der Punkte für das Modell an die Verteilung der Äste im realen Baum angepasst werden, um eine genauere Nachbildung zu erhalten.

Die Anzahl der Äste beziehungsweise der Astsegmente im fertigen Modell wird durch die Anzahl der Punkte in der Punktfolge bestimmt [27]. Die Modelle in 3.4 wurden abgesehen von der Mächtigkeit von \mathcal{P} mit denselben Parametern generiert. Das Modell in Abbildung 3.4(a) hat mehr Äste und sieht dadurch dichter bewachsen aus als das Modell in Abbildung 3.4(b), bei dem eine Punktfolge \mathcal{P} mit dreimal weniger Punkten zur Generierung verwendet wurde.

3.4 Attraction Map

In den beiden vorherigen Abschnitten wurde beschrieben wie das Skelett des Baumes G aufgebaut ist und dass der Raum, den das Skelett nach der Generierung einnehmen soll, durch eine Punktfolge \mathcal{P} modelliert wird. In diesem Abschnitt wird die *Attraction Map* eingeführt, die Knoten von G auf zugehörige Attraction Points \mathbf{p}_k aus \mathcal{P} abbildet. Sie wird verwendet, um das Skelett zu generieren.

Zu Beginn der Generierung besteht das Skelett nur aus dem Wurzelknoten \mathbf{v}_0 und



(a) Das Modell eines Baumes, das aus einer Punktfolge mit 900 Punkten generiert wurde.
(b) Dieser Baum wurde aus einer Punktfolge der Größe 300 generiert, bei gleichem Rotationskörper R wie in Abbildung (a).

Abbildung 3.4: Auswirkungen von Variationen von $|\mathcal{P}|$ auf das Modell eines Baumes.

es sollen sukzessiv Knoten und Kanten hinzugefügt werden, in Anlehnung an das Wachstums eines Baumes [27]. Der verfügbare Raum, der durch die Punktfolge modelliert wird, wird verwendet um zu bestimmen an welchem Knoten $\mathbf{v} \in \mathcal{V}$ das Skelett um einen Kindknoten erweitert wird und welche Position dieser Knoten hat. Dafür wird die Attraction Map

$$\mathcal{M} : V \rightarrow \mathfrak{P}(\mathcal{P}) \quad (3.14)$$

verwendet, welche Knoten aus \mathcal{V} auf die Potenzmenge $\mathfrak{P}(\mathcal{P})$, also auf Teilmengen von \mathcal{P} abbilden. $\mathcal{M}(\mathbf{v}_i)$ entspricht der Teilmenge von Punkten, die den Knoten \mathbf{v}_i beeinflussen. Ein Attraction Point $\mathbf{p}_k \in \mathcal{P}$ kann Einfluss auf genau einen Knoten $\mathbf{v}_i \in \mathcal{V}$ haben. Dieser Knoten ist genau der Knoten, der von allen Knoten aus \mathcal{V} den geringsten Abstand zu \mathbf{p}_k hat und wird durch die Funktion

$$n(\mathbf{p}) = \mathbf{v}, \text{ wenn } \forall \mathbf{v}' \in \mathcal{V}. \ | \mathbf{v} - \mathbf{p} | \leq | \mathbf{v}' - \mathbf{p} | \quad (3.15)$$

zurückgegeben. Damit \mathbf{v}_i von \mathbf{p}_k beeinflusst wird, muss außerdem der Abstand zwischen ihnen kleiner sein als ein festgelegter Parameter d_e . Insgesamt lässt sich die Attraction Map also definieren als

$$\mathcal{M}(\mathbf{v}) = \{ \mathbf{p} \mid n(\mathbf{p}) = \mathbf{v} \wedge | \mathbf{v} - \mathbf{p} | \leq d_e \}. \quad (3.16)$$

Die Kindknoten werden so platziert, dass der Baum in den verfügbaren Raum hineinwächst [27]. Dafür wird $\mathcal{M}(\mathbf{v}_i)$, die Menge der beeinflussenden Attraction Points von \mathbf{v}_i benutzt. Für jeden Knoten \mathbf{v}_i für den $\mathcal{M}(\mathbf{v}_i)$ nicht leer ist, wird ein Kindknoten \mathbf{v}'_i zu \mathcal{V} und eine Kante $(\mathbf{v}_i, \mathbf{v}')$ zu \mathcal{E} hinzugefügt. Für die Berechnung der Position von \mathbf{v}'_i werden die Koordinaten der Punkte aus $\mathcal{M}(\mathbf{v}_i)$ verwendet. Der Knoten \mathbf{v}'_i wird in Richtung der Punkte $\mathcal{M}(\mathbf{v}_i)$ platziert. Diese Punkte haben also sozusagen eine anziehende Wirkung bei der Generierung neuer Knoten, daher die Bezeichnung Attraction Points. Wie genau die Berechnung der Position von \mathbf{v}'_i abläuft wird in Unterabschnitt 3.5.1 beschrieben.

3.5 Generierung des Skeletts

In diesem Abschnitt wird beschrieben wie das Skelett als strukturelle Grundlage des Baumes generiert wird. Mit dem in Unterabschnitt 3.5.1 beschriebenen Algorithmus wird eine Rohfassung des Skeletts generiert. Möglichkeiten zur Nachbearbeitung werden in Unterabschnitt 3.5.2 vorgestellt.

3.5.1 Space Colonization

Das Skelett des Baumes wird so generiert, dass es in einen festgelegten Raum hineinwächst.

Zu Beginn der Generierung liegt ein Baum $G = (\mathcal{V} = \{\mathbf{v}_0\}, \mathcal{E} = \emptyset)$ und eine Punktewolke \mathcal{P} vor.

Die Punktewolke wird mit einer festgelegten Anzahl von Punkten wie in Unterabschnitt 3.3.1 beschrieben gefüllt. Dafür muss die Anzahl der Punkte $|\mathcal{P}|$ und die Menge S von Punkten, mit denen die Funktion f generiert werden soll, festgelegt werden.

Mit G und \mathcal{P} als Grundlage wird mit dem Space Colonization Algorithmus das Skelett des Baumes generiert [27]. Die Attraction Map $\mathcal{M}(v)$ bildet Knoten aus \mathcal{V} auf die Attraction Points aus \mathcal{P} ab, die sie beeinflussen. Während der Generierung werden bei jedem Schritt Knoten und Kanten zu G hinzugefügt und Attraction Points aus \mathcal{P} entfernt, weshalb sich $\mathcal{M}(\mathbf{v})$ nach jedem Schritt ändert. Dabei werden die in den folgenden Unterabschnitten beschriebenen Schritte solange wiederholt, bis bei der Aktualisierung der Attraction Map jeder Knoten auf die leere Menge abgebildet wird oder eine festgelegte Anzahl an Iterationen erreicht wurde.

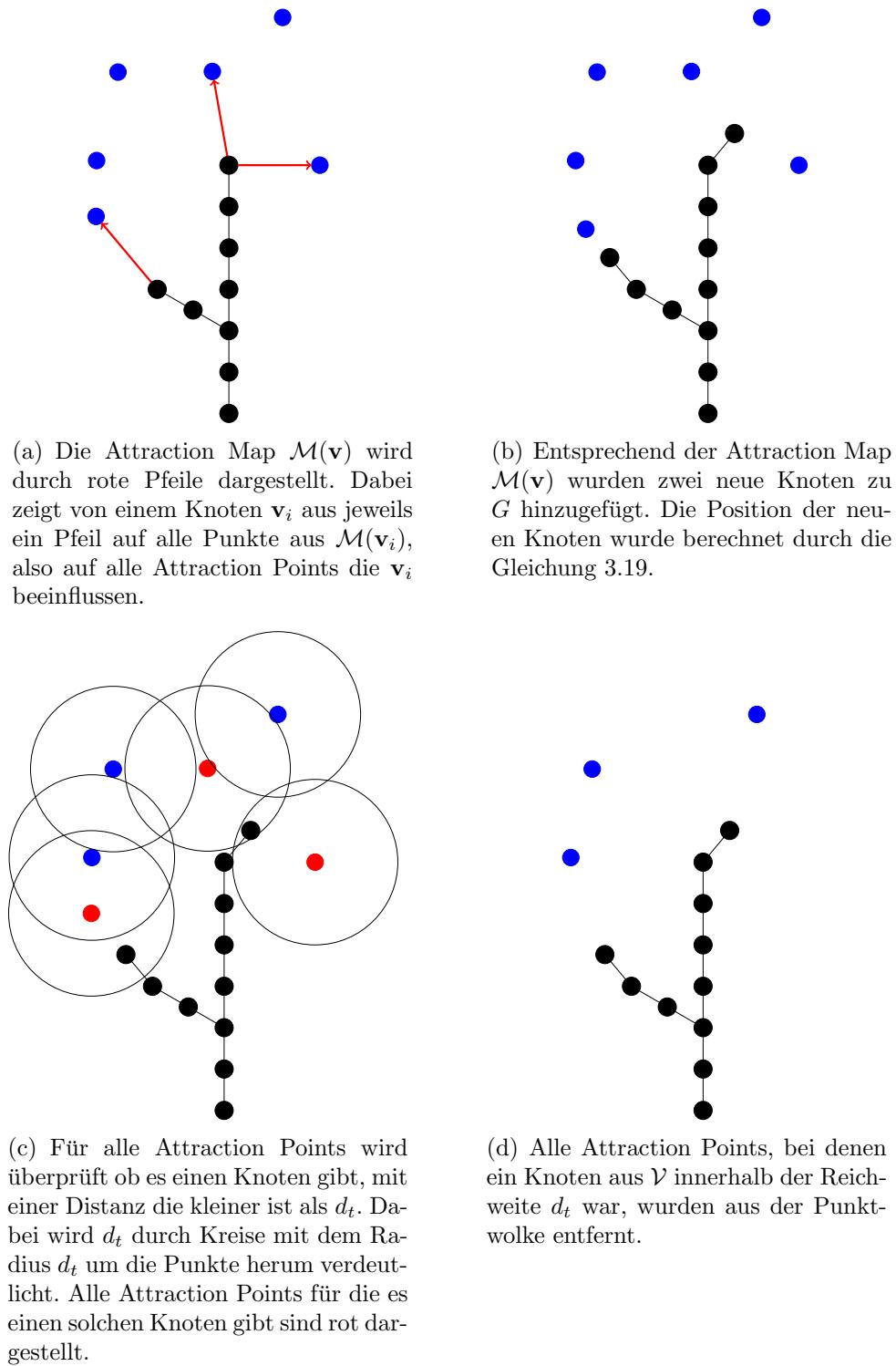


Abbildung 3.5: Die wesentlichen Schritte des Space Colonization Algorithmus. Als Ausgangssituation liegt ein Skelett G und eine Punktfolge \mathcal{P} vor. Die Knoten des Skeletts sind dargestellt als schwarze Scheiben und die Kanten als schwarze Linien, sowie die Attraction Points von \mathcal{P} als blaue Scheiben.

Hinzufügen von neuen Knoten zum Skelett

Für jeden Knoten \mathbf{v}_i , für den $\mathcal{M}(\mathbf{v}_i)$ nicht leer ist, wird ein Kindknoten \mathbf{v}'_i zu \mathcal{V} und eine Kante $(\mathbf{v}_i, \mathbf{v}'_i)$ zu \mathcal{E} hinzugefügt [27]. Die Koordinaten von \mathbf{v}'_i sollen so gewählt werden, dass der verfügbare Platz mit Knoten gefüllt wird, sodass der Baum in ihn hineinwächst. Der Knoten wird in Richtung des Vektors \mathbf{n}_i mit dem Abstand d von \mathbf{v}_i platziert.

Um den Richtungsvektor \mathbf{n}_i zu bestimmen wird zunächst der Vektor

$$\mathbf{h}_i = \sum_{\mathbf{p}_k \in \mathcal{M}(\mathbf{v}_i)} \langle \mathbf{p}_k - \mathbf{v}_i \rangle \quad (3.17)$$

berechnet, der von \mathbf{p}_k aus in die mittlere Richtungsvektor zu allen Punkten aus $\mathcal{M}(\mathbf{v}_i)$ ist. Es kann zusätzlich ein weiterer Richtungsvektor \mathbf{b} verwendet werden, der äußere Einflüsse, wie beispielsweise das Gewicht der Äste, miteinbezieht [27]. Die normierte Addition von diesem Bias \mathbf{b} und dem normierten Vektor \mathbf{h}_i ergibt so den Richtungsvektor

$$\mathbf{n}_i = \langle \langle \mathbf{h}_i \rangle + \mathbf{b} \rangle. \quad (3.18)$$

Insgesamt beschreibt die Gleichung

$$\mathbf{v}'_i = \mathbf{v}_i + d \cdot \mathbf{n}_i \quad (3.19)$$

die Position von \mathbf{v}'_i .

In Abbildung 3.5 ist das Hinzufügen von neuen Knoten in den Abbildungen 3.5(a) und 3.5(b) dargestellt. Die Knoten \mathcal{V} und Kanten \mathcal{E} eines Baumes G sind als schwarze Scheiben und schwarze Linien dargestellt. Blauen Scheiben repräsentieren die Attraction Points der Punktfolke \mathcal{P} . In Abbildung 3.5(a) ist die Ausgangssituation dargestellt. Als Darstellung der Attraction Map zeigt von jedem Knoten des Skeletts jeweils ein Pfeil zu allen Attraction Points, die ihn beeinflussen. In Abbildung 3.5(b) wurden entsprechend der Gleichung 3.19 zwei neue Knoten zu G hinzugefügt. Dabei wurde der Nullvektor als Bias \mathbf{b} verwendet.

Aktualisierung der Punktfolke

Durch das Hinzufügen von Knoten gelangt der Baum näher an Punkte aus \mathcal{P} heran. Wenn dabei die Distanz d_t unterschritten wird, gilt der durch diese Punkte markierte Platz als bereits eingenommen, diese Punkte können deshalb entfernt werden [27]. Dafür wird für jeden Attraction Point $\mathbf{p}_k \in \mathcal{P}$ überprüft ob der Knoten mit dem

geringsten Abstand zu \mathbf{p}_k die Distanz d_t unterschritten hat. Um den Knoten mit dem geringsten Abstand zu bekommen, kann die Funktion 3.15 aus Unterabschnitt 3.4 verwendet werden. Ein Attraction Point \mathbf{p}_k wird aus \mathcal{P} entfernt, wenn für die Funktion

$$rm(\mathbf{p}) = \begin{cases} 1 & , \text{ für } |n(\mathbf{p}) - \mathbf{p}| \leq d_t \\ 0 & , \text{ sonst} \end{cases} \quad (3.20)$$

gilt $rm(\mathbf{p}_k) = 1$.

In Abbildung 3.5(c) ist d_t durch Kreise mit dem Radius d_t um die Attraction Points dargestellt. Bei den drei Attraction Points die in Abbildung 3.5(a) teil der Attraction Map waren, liegt ein Knoten des Skeletts innerhalb des Kreises der d_t darstellt. Diese werden deshalb, wie verdeutlicht in Abbildung 3.5(d), aus \mathcal{P} entfernt.

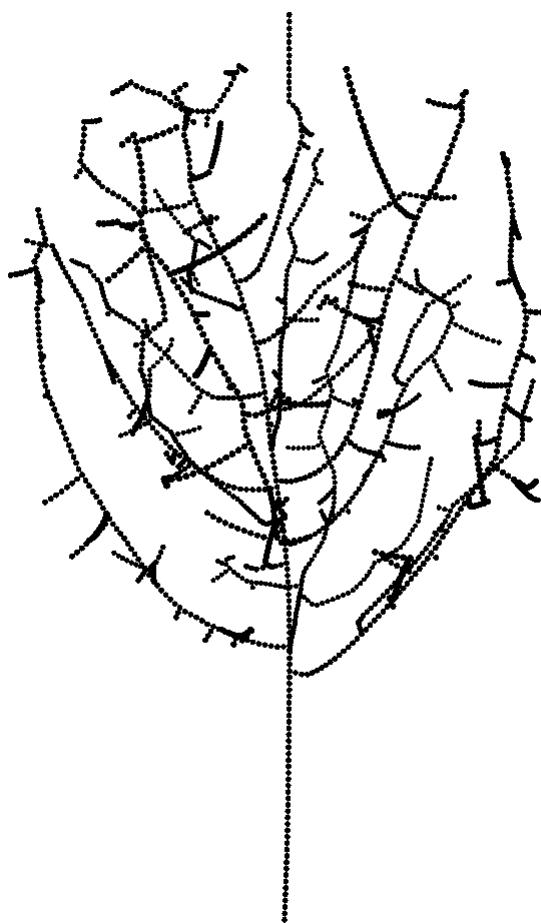
3.5.2 Nachbearbeitung

Als Ergebnis des Space Colonization Algorithmus liegt ein Skelett des gewünschten Baummodells, wie zu sehen in Abbildung 3.6, vor. Diese Rohfassung hat typischerweise einige Makel, die in den Abbildungen 3.6(b) bis 3.6(c) dargestellt sind.

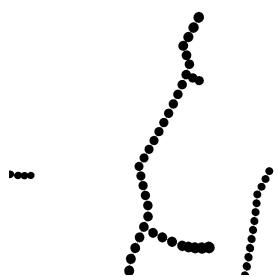
In Abbildung 3.6(d) ist zu sehen, dass die Winkel in den entstehenden Verzweigungen so groß ausfallen, dass sie unnatürlich wirken können. Ein Verfahren mit dem die Größe dieser Winkel reduziert werden kann wird in Unterabschnitt 3.5.2 beschrieben. In Abbildung 3.6(b) ist ein Ast zu sehen, welcher nicht eine gleichmäßige kurvige Form hat, sondern aus mehreren eher geraden Abschnitten besteht. Dadurch entstehen ungewollte sichtbare Knicke, wie in Abbildung 3.6(c) dargestellt. Um die Optik im Bezug darauf zu verbessern wird ein in Unterabschnitt 3.5.2 vorgestelltes Verfahren angewandt, das die Knicke an den Ästen glättet. Für diese beiden Schritte der Nachbearbeitung ist es vorher notwendig die Anzahl der Knoten des Skeletts zu reduzieren, ohne die grundlegende Struktur zu verändern. In Unterabschnitt 3.1 wird beschrieben wie die Knoten des Skeletts bei Beibehaltung der Struktur dezimiert werden können.

Dezimierung der Knoten

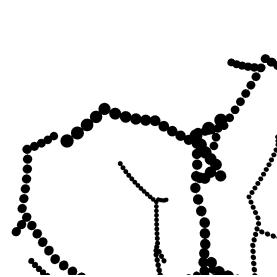
Die Länge eines Astabschnitts, also der Abstand zwischen zwei durch eine Kante verbundenen Knoten, bestimmt über die Auflösung des Skeletts. Bei der Generierung wird die Auflösung durch den Parameter d bestimmt. In diesem Schritt der Nachbearbeitung soll die Auflösung des Skeletts so verkleinert werden, dass die grund-



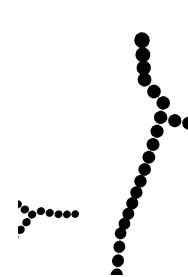
(a) Das vollständige Skelett als Ergebnis des Space Colonization Algorithmus. Die Knoten sind als Kreise und die Kanten als Linien dargestellt.



(b) Ein Ast mit sichtbaren Knicken.

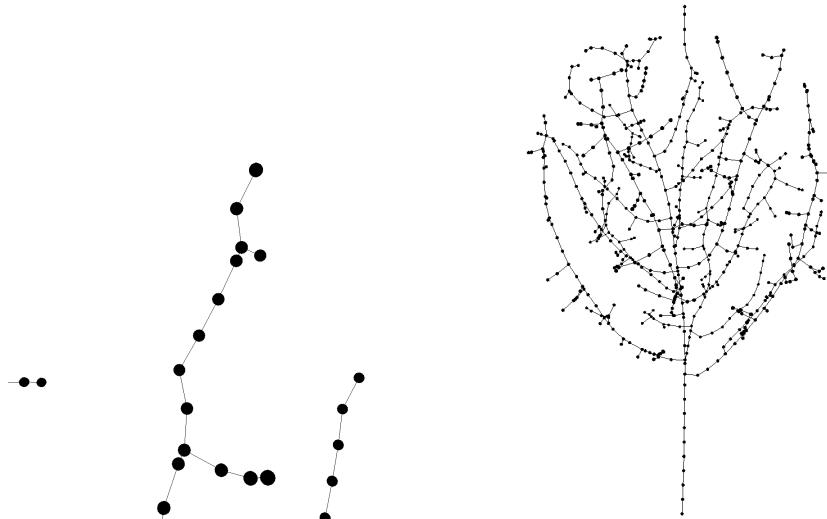


(c) Ein weiteres Beispiel für Äste mit sichtbaren Knicken.



(d) Eine Verzweigung mit einem Winkel von ungefähr 90 Grad.

Abbildung 3.6: Darstellung eines Skeletts, das als Rohmodell mit dem Space Colonization Algorithmus generiert wurde. In den Abbildungen (b) bis (b) werden Detailausschnitte des Baumes gezeigt, an denen optische Makel die aus der Generierung resultieren sichtbar sind. Die Äste des Rohmodells können deutlich sichtbare Knicke aufweisen und die Winkel von Verzweigungen sind häufig ungefähr senkrecht, was ebenfalls zu einem unnatürlichen Aussehen führt.



(a) Der Abschnitt des Skeletts aus Abbildung 3.6(b) nach der Dezimierung der Knoten. Die Form des Astes ist dabei mit allen Knicken und den Verzweigungen erhalten geblieben.

(b) Das Skelett aus 3.6(a) nach der Dezimierung der Knoten um circa 69.38%.

Abbildung 3.7: Beispielhafte Resultate der Dezimierung der Knoten eines Baumskeletts.

legende Struktur nicht verändert wird. Dafür müssen alle Verzweigungen und eine gleichmäßige Verteilung der Knoten erhalten bleiben.

Ein Beispiel dafür ist in Abbildung 3.7(b) zu sehen. Das Skelett in Abbildung 3.7(b) entspricht dem aus Abbildung 3.6(a) nach der Reduktion der Auflösung durch Dezimierung der Knoten von G . Vor der Dezimierung bestand G aus 2015 Knoten und nach der Dezimierung aus 617. Trotz der Einsparung von circa 69.38% ist die Grundstruktur erhalten geblieben.

Damit die Verzweigungen erhalten bleiben, wird die Dezimierung für jeden Ast (siehe Unterabschnitt 3.2) unabhängig ausgeführt, statt einmal für den gesamten Baum.

Die Dezimierung der Knoten eines Astes $G' = (\mathcal{V}', \mathcal{E}')$ erfolgt nach Algorithmus 3.1. Dabei wird jeder Ast über seine inneren Knoten v_2 bis v_{l-1} durchlaufen, und der Abstand zum Elternknoten in der Variable d_a aufaddiert. Ist d_a im aktuellen Knoten kleiner als der Parameter τ_a , so wird der Knoten samt seiner Kanten entfernt und eine Kante vom Eltern- zum Kindknoten hinzugefügt. Ansonsten wird der Knoten behalten und d_a auf 0 zurückgesetzt. Auf diese Weise werden die Knoten so dezimiert, dass eine gleichmäßige Verteilung auf dem Ast erhalten bleibt. Diese Dezimierung wird für alle Äste von G ausgeführt.

Die Wahl von τ_a bestimmt darüber wie stark die Knoten dezimiert werden. Das

```

Eingabe: Ast  $G' := (\mathcal{V}', \mathcal{E}')$ ,  $\tau_a, d$ 
 $l := |\mathcal{V}'|$ 
 $d_a := 0$ 
for ( $1 < i < l$ ) do
  if ( $d_a < \tau_a$ ) then
    entferne  $\mathbf{v}_i$  aus  $\mathcal{V}'$ 
    entferne  $e_{i-1}$  und  $e_i$  aus  $\mathcal{E}'$ 
    füge  $(\mathbf{v}_{i-1}, \mathbf{v}_{i+1})$  zu  $\mathcal{E}'$  hinzu
     $d_A := d_a + d$ 
  else
     $d_A := 0$ 
  end if
end for

```

Algorithmus 3.1: Algorithmus zur Dezimierung der Knoten eines Astes nach [27].

Skelett in Abbildung 3.7(b) wurde mit $\tau_a = 4d$ dezimiert, sodass von den inneren Knoten eines Astes circa jeder vierte Knoten behalten, und die anderen entfernt wurden.

Reduzierung der Winkelgrößen an Verzweigungen

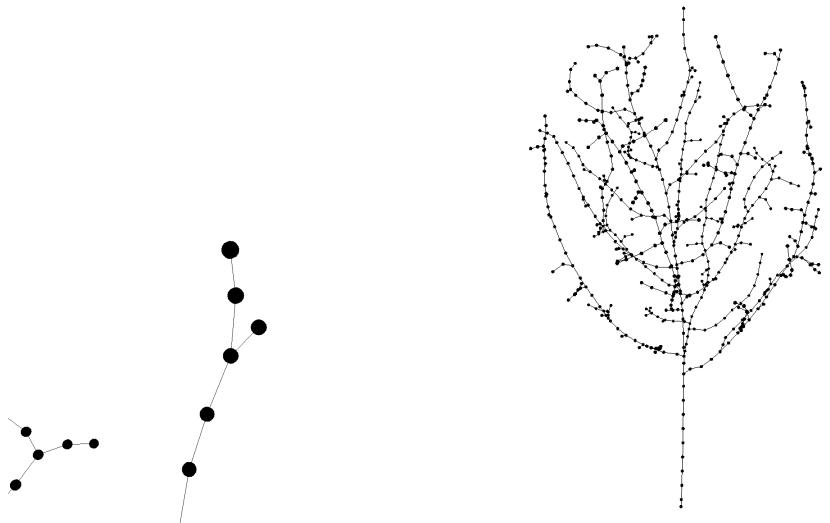
Beim Generieren des Baumskelett können Verzweigung entstehen, bei denen die Winkel zwischen den folgenden Ästen so groß ausfallen, dass sie unnatürlich wirken können. Falls das bei der Generierung nicht gewünscht ist, können die Winkel mit dem im Folgenden beschriebenen Verfahren verkleinert werden.

Für alle Knoten $\mathbf{v}_i \in \mathcal{V} \setminus \{\mathbf{v}_0\}$ sei d_i die euklidische Distanz zwischen \mathbf{v}_i und seinem Elternknoten, und \mathbf{u}_i der Vektor von \mathbf{v}_i zu seinem Elternknoten. Um die genannten Winkel zu reduzieren, wird die Position von jedem Knoten \mathbf{v}_i angepasst, sodass

$$\mathbf{v}'_i = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} + \frac{d_i}{2} \cdot \mathbf{u}_i . \quad (3.21)$$

Der Effekt von diesem Schritt wird stärker sichtbar, wenn der Abstand zwischen den Kanten größer ist. Deswegen verstärkt sich der Effekt, wenn vorher die Knoten des Skeletts, wie im vorherigen Unterabschnitt beschrieben, dezimiert werden, besonders wenn ein hoher Wert für d_a gewählt wurde [27].

In Abbildung 3.8(a) ist der gleiche Ausschnitt des Skeletts dargestellt wie in Abbildung 3.6(d), jedoch nach der Dezimierung und Reduzierung der Winkelgrößen. Durch die Reduzierung der Winkelgrößen können typische Verzweigung eines realen



(a) Der gleiche Ausschnitt des Skeletts wie in Abbildung 3.6(d). Der Winkel an der Verzweigung im Vordergrund wurde durch das Verfahren aus Unterabschnitt 3.5.2 verkleinert.

(b) Das Skelett aus Abbildung 3.7(b) nach der Nachbearbeitung durch Reduzierung der Winkelgrößen an den Verzweigungen.

Abbildung 3.8: Beispielhafte Resultate der Reduzierung der Winkelgrößen an Verzweigungen nach der Dezimierung der Knoten.

Baumes ansprechender modelliert wird. In Abbildung 3.8(b) ist der gesamte Baum nach der Dezimierung der Knoten und Reduzierung der Winkelgrößen abgebildet.

Unterteilung der Äste

An den Knoten zwischen den einzelnen Segmenten können, wie in Abbildung 3.6(b), sichtbare Knicke in Ästen entstehen. Durch die Dezimierung der Knoten kann das noch verstärkt werden.

Diese Knicke können geglättet werden, indem die Segmente des Skeletts weiter unterteilt werden [27]. Dafür werden Splines verwendet wie beschrieben in Unterabschnitt 3.3. Wie die Dezimierung der Knoten wird dieser Schritt der Nachbearbeitung auf jedem Ast ausgeführt, statt einmal auf dem gesamten Skelett.

Die Unterteilung eines Astes $G' = (\mathcal{V}', \mathcal{E}')$ mit $|\mathcal{V}'| = l$ erfolgt nach Algorithmus 3.2. Für die Punkte aus \mathcal{V}' wird eine Splinefunktion g berechnet, mit der dann eine Menge \mathcal{S} von zusätzlichen Unterteilungspunkten berechnet wird. Die Unterteilungspunkte sind gleichmäßig mit einem Abstand von d_u auf dem Graphen von g verteilt. Um sie in das Skelett einzugliedern, werden alle inneren Knoten des Astes und all ihre Kanten entfernt. Die Unterteilungspunkte werden mit Kanten verbunden und dann

Eingabe: Ast $G' := (\mathcal{V}', \mathcal{E}')$, d_u

$l := |\mathcal{V}'|$

$g :=$ Spline für die Punkte aus \mathcal{V}'

$\mathcal{S} :=$ Menge von Punkten, die mit Abstand d_u voneinander auf dem Graph von g liegen

$m := |\mathcal{S}|$

for ($1 < i < l$) **do**

entferne Knoten \mathbf{v}_i aus \mathcal{V}'

end for

for ($1 <= i <= l - 1$) **do**

entferne die Kante $(\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_{i+1})$ aus \mathcal{E}'

end for

for ($1 <= i <= m$) **do**

füge Knoten \mathbf{s}_i zu \mathcal{V}' hinzu

end for

for ($1 <= i <= m - 1$) **do**

füge die Kante $(\mathbf{s}_i, \mathbf{s}_{i+1})$ zu \mathcal{E}' hinzu

end for

füge die Kanten $(\mathbf{v}_1, \mathbf{s}_1)$ und $(\mathbf{s}_m, \mathbf{v}_l)$ zu \mathcal{E}' hinzu

Algorithmus 3.2: Algorithmus der einen Ast G' unterteilt, indem zusätzliche Knoten eingefügt werden.

mit dem ersten und dem letzten Knoten des Astes, sodass eine neue Verkettung

$$\forall \mathbf{v}'_i \in \mathcal{V}' (1 \leq i \leq l' - 1) \Rightarrow e_i = (\mathbf{v}'_i, \mathbf{v}'_{i+1}) \in \mathcal{E}' \quad (3.22)$$

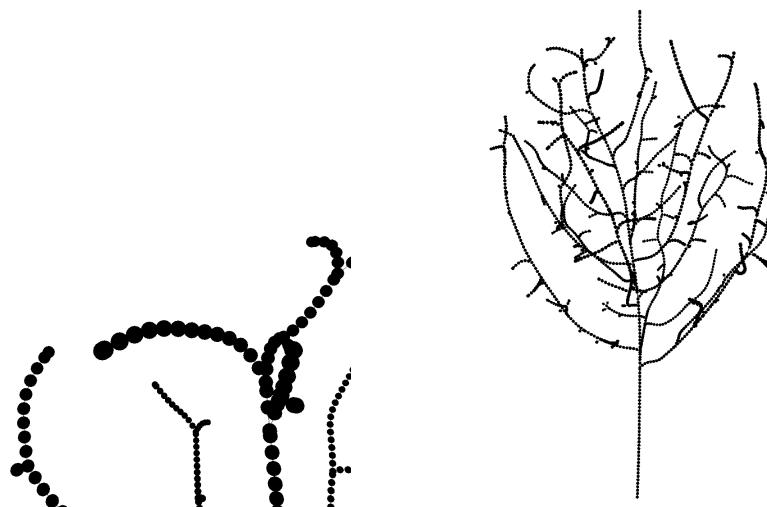
entsteht, wobei l' der Anzahl der Knoten von G' nach der Unterteilung entspricht. Dabei entspricht der erste Knoten \mathbf{v}'_1 dem alten Knoten \mathbf{v}_1 und der letzte Knoten $\mathbf{v}'_{l'}$ dem alten Knoten \mathbf{v}_l . Dadurch ändert sich bei der Ausführung der Unterteilung auf alle Äste von G die Grundstruktur nicht und es bleiben alle Verzweigungen erhalten. Da für die Berechnung einer Splinefunktion mindestens drei Knoten benötigt werden, wird der Algorithmus nur für Äste ausgeführt, die mindestens drei Knoten enthalten. Vor der Unterteilung der Äste werden durch die Dezimierung der Knoten Stücke der Äste entfernt, damit sie bei der neuen Unterteilung der Äste durch Stücke ersetzt werden können, die keine Knicke enthalten und optisch ansprechender sind.

In Abbildung 3.9(a) ist der Ausschnitt des Skeletts aus Abbildung 3.6(c) nach der Unterteilung der Äste abgebildet. Zuvor wurden die Knoten dezimiert und die Größen der Winkel an Verzweigungen reduziert. Die Knicke am Ast links im Bild und an dem Ast im Vordergrund sind verschwunden und die Äste haben stattdessen eine gleichmäßig kurvige Form. In Abbildung 3.9 ist das Skelett aus 3.6(a) nach der ge-

samten Nachbearbeitung bestehend aus Dezimierung der Knoten, Reduzierung der Winkelgrößen und Unterteilung der Äste zu sehen. Bei der Unterteilung wurden mit dem ursprünglichen Abstand, also $d_u = d$, neue Knoten hinzugefügt, sodass die Knotendichte wieder ungefähr der Knotendichte des ursprünglichen Skeletts entspricht. Durch die Unterteilung der Äste sind grobe Knicke aus den Ästen verschwunden.

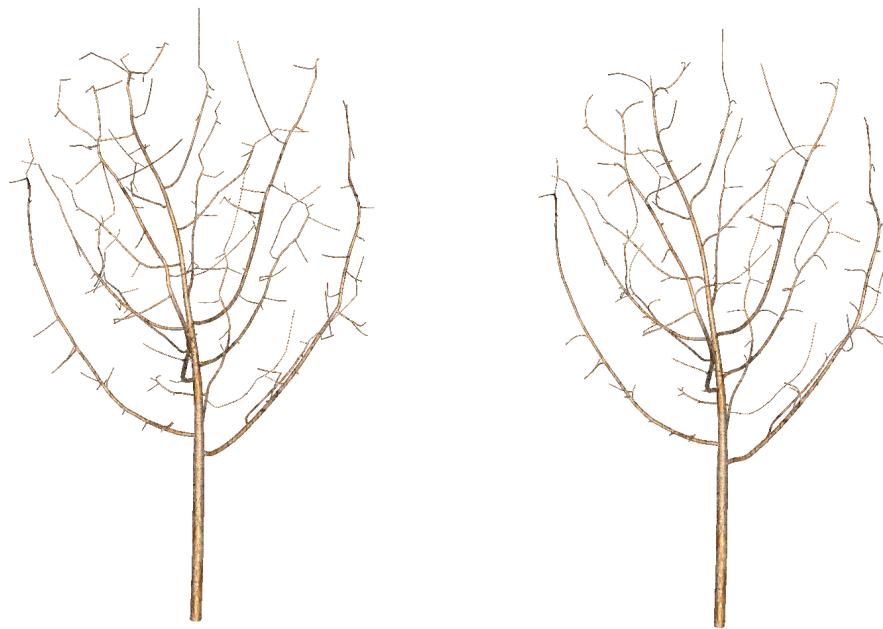
In Abbildung 3.10 sind zwei graphische Modelle zum Vergleich dargestellt. Das Modell in Abbildung 3.10(a) wurde mit dem Skelett aus Abbildung 3.6(a) erzeugt. Im Gegensatz dazu wurde das Modell in Abbildung 3.10(b) mit dem gleichen Skelett nach der vollständigen Nachbearbeitung, wie in Abbildung 3.9(b) gezeigt, erzeugt. Die Knicke in den Ästen sind durch die Nachbearbeitung verschwunden, was zu einem insgesamt ruhigeren Erscheinungsbild führt. Dieser Unterschied resultiert aus der Unterteilung der Äste, welche ohne die vorherige Dezimierung der Knoten weniger wirksam wäre. Auch die Verkleinerung der Winkel an Verzweigungen ist an einigen Stellen, vor allem an den Astspitzen, bemerkbar. Ein Ast, der in einem rechten Winkel oder in Richtung Boden aus einem anderen Ast ragt, wirkt subjektiv gesehen weniger realistisch, weswegen die Verzweigungen des Modells in Abbildung 3.10(b) ansprechender sind.

Insgesamt ist dabei die Grundstruktur des Baumes soweit erhalten geblieben, dass die beiden Modelle als der gleiche Baum mit Modifizierungen erkennbar sind.



(a) Der gleiche Abschnitt des Skeletts wie in Abbildung 3.6(c) nach der Unterteilung der Äste.
 (b) Das Skelett aus Abbildung 3.8(b) nach der Unterteilung der Äste.

Abbildung 3.9: Beispielhafte Resultate der Unterteilung der Äste nach der Dezimierung der Knoten und Reduzierung der Winkelgrößen.



(a) Das graphische Modell das aus dem Skelett in Abbildung 3.6(a) erzeugt wurde. Das Skelett ist eine Rohfassung die als Ergebnis des Space Colonization Algorithmus vorliegt.

(b) Das graphische Modell das mit dem gleichen Skelett wie in Abbildung (a) nach der vollständigen Nachbearbeitung generiert wurde.

Abbildung 3.10: Vergleich von graphischen Modellen, die auf dem gleichen Skelett vor und nach der Nachbearbeitung basieren.

3.6 Überführung des Skeletts in ein graphisches Modell

Mit dem Space Colonization Algorithmus wurde das Skelett eines Baumes generiert, welches gegebenenfalls nachbearbeitet wurde. In diesem Abschnitt wird beschrieben, wie aus den Daten des Skeletts ein graphisches Modell erzeugt wird.

3.6.1 Modellierung von Astsegmenten

Bei einem Skelett G repräsentiert jede Kante $e \in \mathcal{E}$ ein Astsegment. Jedes Astsegment wird durch einen Kegelstumpf modelliert, dessen Deck- und Grundfläche so rotiert werden, dass sie nahtlos an die anliegenden Astsegmente anschließen. Auf diese Weise entstehen graphische Modelle wie beispielsweise die in Abbildung 3.10. Der Kegelstumpf für ein Segment $e_i = (\mathbf{v}_{i-1}, \mathbf{v}_i)$ wird als T_i bezeichnet. Dabei bildet der Vektor $\mathbf{r}_i = \mathbf{v}_i - \mathbf{v}_{i-1}$ die Achse von T_i , wobei \mathbf{v}_{i-1} den Mittelpunkt der Grundfläche bildet und \mathbf{v}_i den Mittelpunkt der Deckfläche. In Abbildung 3.11 ist

ein solcher Kegelstumpf T_i dargestellt.

Berechnung der Dicke

Die Äste eines Baumes werden zu den Spitzen hin dünner, deswegen unterscheidet sich die Dicke des Astsegments am Knoten \mathbf{v}_{i-1} von der am Knoten \mathbf{v}_i . Die Dicke der Äste wird rekursiv für alle Knoten berechnet [27]. Die Funktion

$$r(\mathbf{v}) = \sqrt[n]{\sum_{\mathbf{v}' \in \mathcal{N}(\mathbf{v})} r(\mathbf{v}')^n} \quad (3.23)$$

berechnet den Radius des Baumes an einem Knoten \mathbf{v}_i anhand der Dicken seiner direkten Nachfolger $\mathcal{N}(\mathbf{v}_i)$ (siehe Gleichung 3.2). Die Dicke der Astspitzen, also aller Knoten \mathbf{v}_i , für die gilt $\mathcal{N}(\mathbf{v}_i) = \emptyset$, wird festgelegt als der Parameter r_0 .

Anpassung der Deck- und Grundflächen

Ein Astsegment $e_i = (\mathbf{v}_{i-1}, \mathbf{v}_i)$ soll nahtlos an das Vorgänger-Astsegment $e_{i-1} = (\mathbf{v}_{i-2}, \mathbf{v}_{i-1})$ und an die nachfolgenden Segmente $\mathcal{E}_{i+1} = \{e' = (\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_{i+1}) \mid \mathbf{v}_{i+1} \in \mathcal{N}(\mathbf{v}_i)\}$ mit den zugehörigen Kegelstümpfen \mathcal{T}_{i+1} anschließen.

Falls ein solches Vorgänger-Astsegment e_{i-1} existiert muss die Grundfläche von T_i rotiert werden. Die Rotation erfolgt mit einer Drehmatrix \mathbf{A}_r , die mithilfe einer Drehachse \mathbf{a} und einem Winkel α erzeugt wird [13].

Die Drehachse

$$\mathbf{a}_{i-1} = \langle \mathbf{r}_i \times \mathbf{r}_{i-1} \rangle \quad (3.24)$$

liegt senkrecht zu den Achsen von T_i und T_{i-1} .

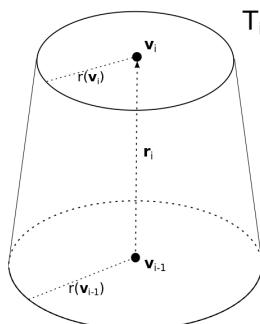


Abbildung 3.11: Darstellung eines Kegelstumpfes T_i , der ein Astsegment e_i modelliert.

Um α zu berechnen wird mit der Funktion

$$h(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_{i-1}) = \arccos \left(\frac{\mathbf{r}_i \cdot \mathbf{r}_{i-1}}{\hat{\mathbf{r}_i} \cdot \hat{\mathbf{r}_{i-1}}} \right) \quad (3.25)$$

zunächst der Winkel zwischen den Achsen von T_i und T_{i-1} berechnet.

Die Grundfläche soll so rotiert werden, dass der Winkel zu \mathbf{r}_i und zu \mathbf{r}_{i-1} der Hälfte von $h(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_{i-1})$ entspricht.

Da die Grundfläche senkrecht zur Achse \mathbf{r}_i steht gilt

$$\alpha_{i-1} = 90 - \frac{h(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_{i-1})}{2}. \quad (3.26)$$

Daraus ergibt sich insgesamt die Drehmatrix

$$\mathbf{A}_{i-1} = \begin{pmatrix} (1-c)x_{i-1}^2 + c & (1-c)x_{i-1}y_{i-1} - sz_{i-1} & (1-c)x_{i-1}z_{i-1} + sy_{i-1} \\ (1-c)y_{i-1}x_{i-1} + sz_{i-1} & (1-c)y_{i-1}^2 + c & (1-c)y_{i-1}z_{i-1} - sx_{i-1} \\ (1-c)z_{i-1}x_{i-1} - sy_{i-1} & (1-c)z_{i-1}y_{i-1} + sx_{i-1} & (1-c)z_{i-1}^2 + c \end{pmatrix} \quad (3.27)$$

mit $s = \sin(\alpha_{i-1})$, und $c = \cos(\alpha_{i-1})$ und $\mathbf{a}_{i-1} = (x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1})$.

Die Grundfläche wird für die Rotation zunächst mit dem Vektor $-\mathbf{v}_{i-1}$ zum Nullpunkt des Koordinatensystems verschoben. Dann wird sie mit der Rotationsmatrix \mathbf{A}_{i-1} gedreht und abschließend mit dem Vektor \mathbf{v}_{i-1} wieder verschoben.

Falls nachfolgende Segmente existiert, sodass $\mathcal{E}_i \neq 0$, muss die Deckfläche von T_i rotiert werden. Dafür wird der Richtungsvektor

$$\mathbf{r}_{i+1} = \sum_{o=1}^{|\mathcal{T}_{i+1}|} \mathbf{r}_o \quad (3.28)$$

benötigt, der als Summe der Achsen aller Nachfolgenden Elemente \mathcal{E}_{i+1} in die mittlere Richtung dieser Achsen zeigt. Die Berechnungen der Drehachse \mathbf{a}_i und des Drehwinkels α_i erfolgt analog zu \mathbf{a}_{i-1} mit den Vektoren \mathbf{r}_{i+1} und \mathbf{r}_i als

$$\mathbf{a}_i = \langle \mathbf{r}_{i+1} \times \mathbf{r}_i \rangle \quad (3.29)$$

und

$$\alpha_i = 90 - \frac{h(\mathbf{r}_{i+1}, \mathbf{r}_i)}{2}. \quad (3.30)$$

Für die Rotationsmatrix \mathbf{A}_i wird dann der negative Drehwinkel $-\alpha_i$ verwendet und die Verschiebung erfolgt analog mit dem Vektor \mathbf{v}_i statt \mathbf{v}_{i-1} .

3.6.2 Ergänzung des Modells um dekorative Komponenten

Das Ergebnis der Überführung des Skeletts in ein graphisches Modell ist ein kahler Baum. Die Oberfläche des Modells kann mit einer passenden Textur an ein Vorbild angepasst werden. Um das Modell genau an ein Vorbild anzupassen oder es mit mehr Leben zu füllen können Komponenten wie Blätter, Blüten oder Früchte beliebig hinzugefügt werden.

In Abbildung 3.12 ist ein Modell eines Baumes zu sehen, bei dem Blätter an die Äste der Baumkrone angebracht wurden. Mit einer Abwandlung des Space Colonization Algorithmus können auch realistische Blätter generiert werden [27].

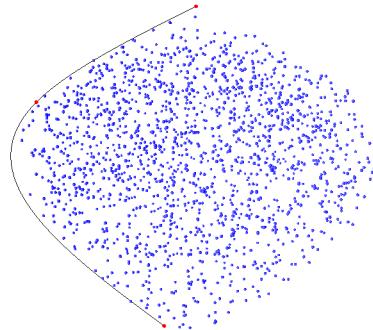
3.7 Ergebnisse der Generierung

Die in diesem Kapitel vorgestellte Generierung von Bäumen besteht aus zwei Schritten. Im ersten Schritt wird das Skelett des Baumes mit dem Space Colonization Algorithmus generiert, welches im zweiten Schritt visualisiert wird. Die Generierung des Skeletts ist dabei durch die Wahl der Form der Punktwolke und einige Parameter steuerbar. Abschließend werden beispielhaft zwei Modelle gezeigt und auf die Wahl der Parameter eingegangen.

Das Modell in Abbildung 3.13(b) wurde mit der V-förmigen Punktwolke aus Abbildung 3.13(a) generiert und stellt einen Busch dar, der ungefähr 3.4 Meter hoch ist.



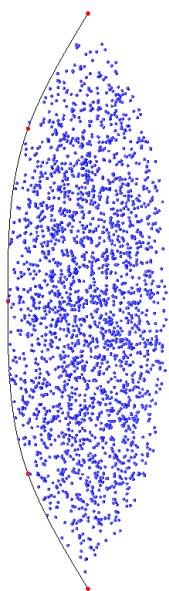
Abbildung 3.12: Das Modell eines Baumes bei dem Blätter hinzugefügt wurden [27].



(a) Eine V-förmige Punktwolke bei der mehr Punkte in den oberen 60% platziert wurden, die für die Generierung des Modells in (b) verwendet wurde. Die zugehörige Splinefunktion wurde aus drei markanten Punkten berechnet.



(b) Durch die Form der Punktwolke und die ungleichmäßige Verteilung ist ein Busch entstanden, bei dem sich am oberen Rand vermehrt Äste befinden.



(c) Eine längliche ovale Punktwolke mit gleichmäßig verteilten Punkten, die für die Generierung des Modells in (d) verwendet wurde. Die zugehörige Splinefunktion wurde aus fünf markanten Punkten berechnet.



(d) Die längliche Punktwolke führt zu einem länglichen Baum. Für die Aktualisierung der Punktwolke wurde eine größere Distanz d_t verwendet als in Abbildung (a), wodurch Attraction Points eher entfernt werden, was zu weniger und geraderen Ästen führt.

Abbildung 3.13: Ein Busch und ein Baum als Ergebnisse der Generierung mit dem Space Colonization Algorithmus.

Die Splinefunktion f wurde mit den markanten Punkten \mathbf{s}_1 bis \mathbf{s}_3 aus

$$\mathcal{S} = \{(0.34, 0), (1.7, 2.38), (0, 3.4)\} \quad (3.31)$$

berechnet. Die Funktion beginnt auf der Höhe des Ursprungs, aber nicht an der Mittelachse des Baumes, sodass es kein klarer Stamm entsteht, sondern die Äste vom Ursprung aus aufgefächert wachsen. Dabei wurden 1700 Attraction Points benutzt, von denen 20% innerhalb der oberen 60% des Rotationskörpers R verteilt wurden, und die anderen 80% auf den gesamten Körper verteilt wurden. Die Distanz d_t die für die Aktualisierung der Punktfolge benutzt wird, wurde als $d_t = 2d$, gewählt. Das Modell in Abbildung 3.13(d) ist wesentlich schmäler als der vorher abgebildete Busch und ist circa sechs Meter hoch. Für die schmale Form wurden die markanten Punkte für die Berechnung der Funktion f gewählt als \mathbf{s}_1 bis \mathbf{s}_5 aus

$$\mathcal{S} = \{(0, 0.6), (0.56, 1.68), (0.75, 3.3), (0.56, 4.92), (0, 6)\}, \quad (3.32)$$

sodass die Punktfolge aus Abbildung 3.13(c) entsteht. Bei diesem Modell wurden 2400 Attraction Points gleichmäßig verteilt und $d_t = 6d$ gewählt, wodurch die Äste im Gegensatz zu 3.13(b) gerader verlaufen und weniger kleinere Zweige entstehen.

4 Einflussfaktoren auf die Struktur von Pflanzen

In Kapitel 3 wurde vorgestellt, wie mithilfe des Space Colonization Algorithmus [27] graphische Modelle von Bäumen und Sträuchern generiert werden können. In diesem Kapitel soll der Realismus der generierten Modelle gesteigert werden, indem Umweltfaktoren untersucht und in die Generierung integriert werden. Dafür wird zunächst die zugrunde liegende Problematik vorgestellt. Danach wird in Abschnitt 4.2 die Szenerie in der die Modelle generiert werden vorgestellt. Die Umweltfaktoren deren Einfluss in die Generierung integriert werden sind Hindernisse in Abschnitt 4.3 und die Lichtverhältnisse in Abschnitt 4.4.

4.1 Problematik

Das Ziel dieser Arbeit ist die Generierung von realistischen Vegetationsszenarien, die an ihre Umgebung angepasst sind und dadurch natürlich erscheinen. Dafür wird wie in Kapitel 1 beschrieben die Generierung von Modellen von Bäumen oder Sträuchern betrachtet.

Die Generierung mit dem Space Colonization Algorithmus erzielt subjektiv empfunden ansprechende, realistische Ergebnisse. Mit dem Algorithmus wird zunächst die Struktur des Baumes, bezeichnet als Skelett, generiert. Die Struktur beschreibt die Position und Länge von Astsegmenten im Raum. Im zweiten Schritt wird diese Struktur in ein graphisches Modell überführt. Durch die Wahl der Parameter der Generierung kann das Modell an eine reale Vorlage angepasst werden. Dabei kann unter anderem Einfluss auf die Form und Größe der Baumkrone und die Dichte und Verteilung der Äste genommen werden.

Allerdings erfolgt die Generierung mit dem Space Colonization Algorithmus entsprechend des Wachstums einer Pflanze unter optimalen Bedingungen. Das Ergebnis spiegelt den Genotyp dieser Pflanze wieder, sodass die Art zu erkennen ist, aber der Phänotyp von Individuen ist zusätzlich durch zahlreiche Umwelteinflüsse in ih-

rer Umgebung geprägt, was bei der Generierung nicht beachtet wird. Pflanzen sind durch ihren festen Standort von ihrer Umgebung abhängig, weshalb die Anpassung an die Umwelt einen hohen Stellenwert hat und bei Pflanzen besonders ausgeprägt und durch Veränderungen des Phänotyps sichtbar ist [32]. Um die erzeugten Modelle realistischer zu machen, sollen ausgewählte Einflüsse in die Generierung integriert werden, sodass Auswirkungen die bei realen Pflanzen auftreten auch beim Modell sichtbar werden. Dafür wird zunächst ein Überblick über einige Umwelteinflüsse gegeben.

Pflanzen brauchen zum Wachsen vor allem Licht, Wasser, Kohlenstoffdioxid und Nährstoffe im richtigen Maß [32]. Sowohl eine zu große Menge als auch eine zu kleine Menge kann schädlich sein und einen negativen Einfluss auf Wachstum einer Pflanze haben. Diese Faktoren sind entscheidend für die Entwicklung einer Pflanze und prägen den Phänotyp.

Auf Pflanzen wirken noch weitere äußere Umwelteinflüsse ein [32]. Dazu zählen beispielsweise das örtliche Klima, bestehend unter anderem aus Temperatur, Wind, Niederschlag und Sonnenscheindauer, oder die Verfügbarkeit von Platz zum Wachsen, der durch Hindernisse eingeschränkt sein kann. Der Mensch kann ebenfalls in die Entwicklung eingreifen, indem er die Umgebungsbedingungen verändert, zum Beispiel durch Düngung, oder die Pflanze direkt beeinflusst.

Bei der Space Colonization gestützten Generierung wird der verfügbare Platz als begrenzender Faktor bereits berücksichtigt. Er ist sogar der zentrale Aspekt nach dem die Generierung ausgeführt wird. Einschränkungen des Platzes, zum Beispiel durch Hindernisse, wurden allerdings nicht beachtet. Diese können großen Einfluss auf das Erscheinungsbild haben, da sie die generelle Form der Pflanze beeinflussen, wenn die Pflanze beispielsweise um ein Hindernis herum wachsen muss. Solche Hindernisse sind relativ unkompliziert in die Generierung integrierbar, da der verfügbare Platz bei der Generierung bereits modelliert wird. Die Möglichkeit der Hindernisintegration wurde bereits bei der Vorstellung der Generierung als Ausblick genannt [27]. In Abschnitt 4.3 wird eine Umsetzung dieser Idee vorgestellt.

Ein weiterer Umwelteinfluss der Umgebung ist das Licht. Durch die Notwendigkeit von Licht für Wachstum und Entwicklung der Pflanzen, ist die Anpassung an die Lichtverhältnisse ausgeprägt und deshalb gut sichtbar [32]. Von daher trägt die Anpassung des Modells an die Lichtverhältnisse dazu bei das Modell an die Szenerie angepasst wirken zu lassen, was den Realismus fördert. In Abschnitt 4.4 werden die Auswirkungen dieser Anpassung auf das Erscheinungsbild untersucht und in die Generierung integriert.

4.2 Erweiterung der Szenerie

Die Szenerie besteht in Kapitel 3 aus einem rechtsdrehenden, kartesischen Koordinatensystem. Dabei bilden x- und z-Achse die horizontalen Achsen, und die y-Achse die vertikale Achse. Für die Erweiterung der Generierung, die in den folgenden Abschnitten vorgestellt wird, ist es nötig die Szenerie um Himmelsrichtungen und ein Kugelkoordinatensystem mit Höhen- und Breitenwinkel zu ergänzen.

Wie in Abbildung 4.1 verdeutlicht wird, entspricht Norden der negativen z-Achse, Osten der positiven x-Achse, Süden der positiven z-Achse und Westen der negativen x-Achse.

Die Szenerie wird um ein Koordinatensystem mit Kugelkoordinaten ergänzt, dessen Ursprung dem des kartesischen Systems entspricht. Ein Punkt wird durch einen vertikalen Winkel h , einen horizontalen Winkel a und einen Radius r angegeben [29]. In Abbildung 4.1 ist ein Punkt $\mathbf{q} = (a, h, r)$ abgebildet. Die senkrechte y-Achse wird als Polachse oder als Zenit bezeichnet und die x-z-Ebene bildet den Horizont. Der vertikale Winkel ist der Höhenwinkel h , der vom Horizont zum Zenit gemessen wird. Der Höhenwinkel der x- und z-Achse beträgt also 0 Grad, und der der y-Achse 90 Grad. Der horizontale Winkel ist der Azimutwinkel a , der von der negativen z-Achse aus in Richtung der positiven x-Achse, also von Norden aus über Osten, gemessen wird. Der Azimutwinkel beträgt für die z-Achse in negativer Richtung 0 und für die x-Achse in positiver Richtung 90 Grad.

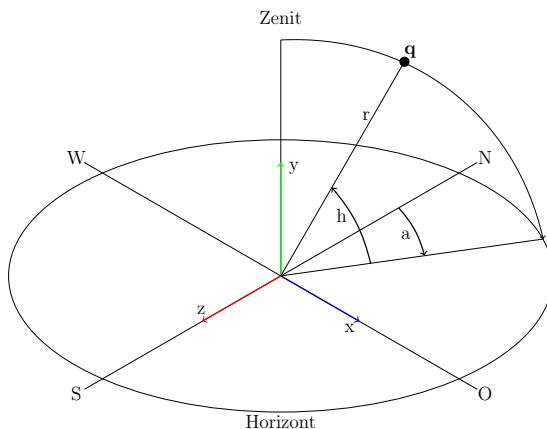


Abbildung 4.1: In der Szenerie können Punkte entweder über ihre kartesischen Koordinaten (x, y, z) oder Kugelkoordinaten (a, h, r) angegeben werden. Zusätzlich sind die Himmelsrichtungen, wie abgebildet, den kartesischen Koordinatenachsen zugeschrieben. Die y-Achse bildet den Zenit. Modifiziert nach [39].

4.3 Hindernisse

Für Pflanzen sind Hindernisse Objekte in ihrer Umgebung, die direkten Einfluss auf ihr Wachstum oder indirekten Einfluss durch Veränderung von anderen Umweltfaktoren haben. Falls sie in den Raum hineinragen, in den die Pflanze ohne das Hindernis wachsen würde, haben die Hindernisse direkten Einfluss auf die Pflanze, durch den die Wachstumsrichtung und -form verändert wird. Der verfügbare Raum wird durch eine Punktwolke \mathcal{P} approximiert, die aus *Attraction Points* besteht, welche für die Generierung verwendet werden. Wie \mathcal{P} modifiziert werden muss, um diese Art von Hindernissen zu berücksichtigen, wird in diesem Abschnitt erläutert. Dafür wird zunächst beschrieben, wie Hindernisse für die Generierung modelliert werden können.

Hindernisse können auch indirekten Einfluss auf Pflanzen und ihr Wachstum haben, indem sie auf andere Einflussfaktoren einwirken. Ein Hindernis kann zum Beispiel die Einstrahlung von Sonnenlicht blockieren und einen Schatten auf die Pflanze werfen, oder die Pflanze vor Wind abschirmen. Gebäude als Hindernis können beispielsweise auch die Umgebungstemperatur der Pflanze beeinflussen, indem sie Wärme abgeben. Von diesen indirekten Einflüssen wird in dieser Arbeit der Schatten in Abschnitt 4.4 thematisiert.

4.3.1 Modellierung von Hindernissen

Um Hindernisse bei der Generierung zu berücksichtigen müssen sie formal definiert werden. Dafür können beispielsweise Polygonnetze verwendet werden, mit denen beliebige Formen als Polyeder beschrieben werden können. In dieser Arbeit werden als beispielhafte Hindernisse rechteckige Gebäude betrachtet, deren Flächen parallel zu den Koordinatenachsen sind.

In Abbildung 4.2 ist ein solches Gebäude

$$B_l = (\mathbf{c}_{l,1}, \mathbf{c}_{l,2}) \quad (4.1)$$

beispielhaft dargestellt. Durch die zwei Punkte $\mathbf{c}_{l,1}$ und $\mathbf{c}_{l,2}$, die wie in Abbildung 4.2 dargestellt diagonal gegenüberliegen, kann das Gebäude eindeutig definiert werden. Für diese Punkte gilt ($x_{l,1} < x_{l,2} \wedge y_{l,1} < y_{l,2} \wedge z_{l,1} < z_{l,2}$). Die Kanten von B_l werden dann jeweils parallel zu einer der Achsen des verwendeten kartesischen Koordinatensystems ergänzt.

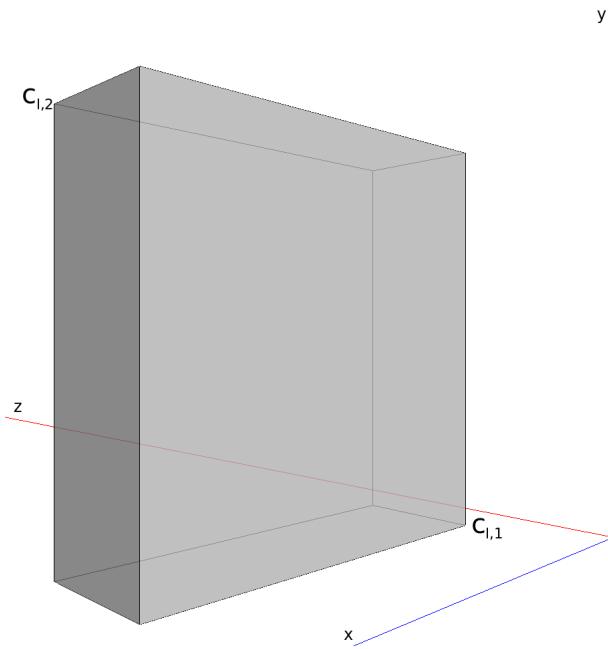
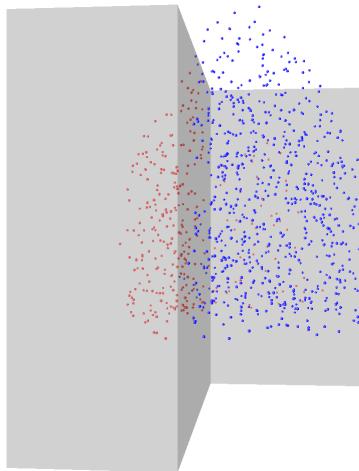


Abbildung 4.2: Eine Szene mit einem Gebäude als Hindernis, in der die Achsen des kartesischen Koordinatensystems dargestellt sind. Über die Punkte $\mathbf{c}_{l,1}$ und $\mathbf{c}_{l,2}$ wird das Gebäude definiert.

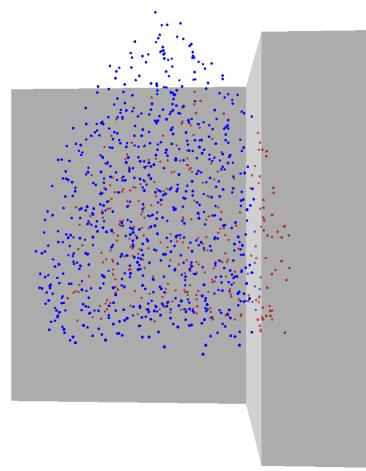
4.3.2 Integration von Hindernissen

Der direkte Einfluss der formalisierten Hindernisse soll in diesem Abschnitt in die Generierung integriert werden. Hindernisse haben direkten Einfluss, wenn sie in den Raum hineinragen, in den die Pflanze ohne Vorkommen des Hindernisses wachsen würde. Die Pflanze wächst dann zwangsläufig an das Hindernis angepasst und es entsteht eine andere Form. Dieser direkte Einfluss kann bei der Generierung mit dem Space Colonization Algorithmus unkompliziert berücksichtigt werden, da die Generierung abhängig vom verfügbaren Platz erfolgt. Der verfügbare Platz wird, wie in Abschnitt 3.3 beschrieben, durch eine Punktfolge \mathcal{P} approximiert. Um mit der Punktfolge zu modellieren, dass der Raum innerhalb der Hindernisse nicht verfügbar ist, wird \mathcal{P} mit allen Hindernissen geschnitten, und alle Punkte entfernt, die innerhalb eines der Hindernisse liegen.

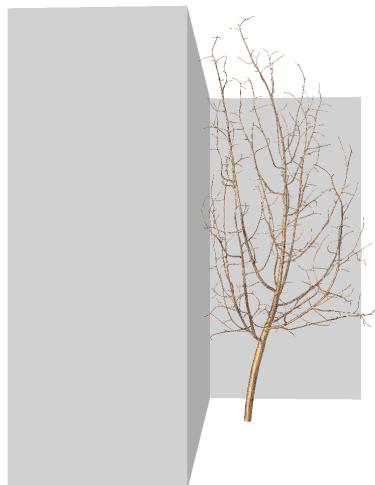
Die Generierung wird also zu Beginn an die Hindernisse der gewählten Szene angepasst und läuft danach regulär wie beschrieben in Kapitel 3 ab. Beliebige Hindernisse können durch Polygonnetze modelliert werden. Diese bestehen aus einer Menge \mathcal{D}_H von Polygonen, vorzugsweise Dreiecke. Um alle Punkte aus \mathcal{P} zu entfernen, die innerhalb von einem Hindernis H liegen, muss für jeden Punkt $\mathbf{p}_k \in \mathcal{P}$ durch einen Punkt-in-Polyeder Test [19] überprüft werden, ob er innerhalb von H liegt.



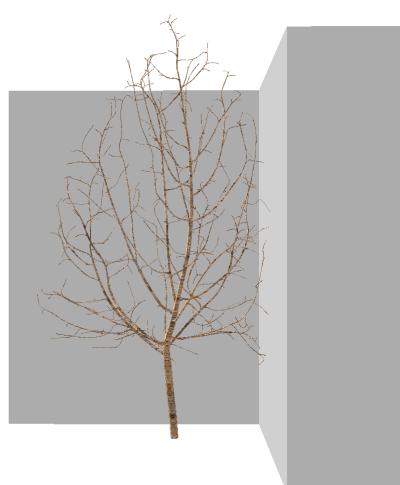
(a) Die Punktwolke in der Vorderansicht. Das Gebäude auf der linken Seite hat eine größere Überschneidung mit der Punktwolke, als das im Hintergrund. Dadurch ist auch die Auswirkung von diesem Hindernis auf das Endprodukt der Generierung größer, wie zu sehen in Abbildung (c).



(b) Die Punktwolke von der rechten Seite. Innerhalb des Gebäudes auf der rechten Seite der Abbildung liegen weniger Attraction Points, weshalb die Auswirkungen auf das Baummodell geringer sind.



(c) Der generierte Baum in der Vorderansicht. Der Stamm des Baumes ist gebogen, als würde er erst vom Schatten des Gebäudes weg wachsen, bis er eine Höhe erreicht, bei der die Sonnenstrahlen über das Gebäude hinweg auf den Baum treffen. Dadurch wirkt das Modell an die Szene angepasst. Der Faktor Licht wurde jedoch nicht beachtet.



(d) Der generierte Baum von der rechten Seite. Im Bezug auf das Gebäude auf der rechten Seite ist der Stamm nicht an das Hindernis angepasst, da er dem Gebäude entgegenwächst. Auch wenn dieses Wachstum möglich ist, würde es das Erscheinungsbild verbessern, wenn auch aus dieser Ansicht eine Anpassung erkennbar wäre.

Abbildung 4.3: In einer Szene mit zwei Gebäuden als Hindernisse wird ein Baum generiert. Um die Generierung an die Hindernisse anzupassen, werden alle Attraction Points der Punktwolke entfernt, welche innerhalb eines Hindernisses liegen. Die Attraction Points die entfernt werden sind als rote Kugeln dargestellt und die übrigen als blaue Kugeln. Die in diesem Kapitel gezeigten Modelle wurden mit einer Baumrinden-Textur erzeugt [34].

Für die verwendeten Gebäude kann zur Überprüfung eines Punktes \mathbf{p}_k die Funktion

$$f(\mathbf{p}_k) = \begin{cases} 1 & , \text{ wenn } x_{l,1} \leq x_k \leq x_{l,2} \wedge y_{l,1} \leq y_k \leq y_{l,2} \wedge z_{l,1} \leq z_k \leq z_{l,2} \\ 0 & , \text{ sonst} \end{cases} \quad (4.2)$$

verwendet werden, da die Wände der Gebäude parallel zu den Achsen sind.

Sei \mathcal{H} die Menge aller Hindernisse die in der Szene beachtet werden sollen, dann entspricht die reduzierte Punktfolge

$$\mathcal{P}_{\mathcal{H}} = \{\mathbf{p}_k \in \mathcal{P} \mid \forall H \in \mathcal{H}. f(\mathbf{p}_k) = 0\} \quad (4.3)$$

der Punktfolge \mathcal{P} , aus der alle Punkte entfernt wurden, die innerhalb eines Hindernisses liegen.

In Abbildung 4.3 ist eine Szene mit zwei Gebäuden abgebildet. In den Abbildungen auf der linken Seite ist jeweils die Szene in frontaler Ansicht zu sehen, während in den Abbildungen auf der rechten Seite die Szene in der Ansicht von rechts gezeigt ist. Die Punktfolge $\mathcal{P}_{\mathcal{H}}$, mit der ein Baum generiert werden soll, wurde mit allen Gebäuden geschnitten und ist in Abbildung 4.3(a) und 4.3(b) durch blaue Kugeln dargestellt. Die Attraction Points aus der ursprünglichen Punktfolge \mathcal{P} , die nicht in der angepassten Punktfolge $\mathcal{P}_{\mathcal{H}}$ enthalten sind, sind als rote Kugeln dargestellt. Bei der Generierung mit dieser angepassten Punktfolge entsteht das Baummodell, das in den Abbildungen 4.3(c) und 4.3(d) gezeigt ist. Durch die Generierung ist der Baum an die Hindernisse angepasst gewachsen. Wegen der fehlenden Attraction Points wird das gesamte Wachstum um die Gebäude herum gelenkt. Der Baum sieht an die Umgebung angepasst aus, was nicht der Fall wäre, hätte man lediglich die Teile des Baummodells entfernt, die sich mit dem Hindernis schneiden.

In Realität hätten Hindernisse schon bei einer größeren Entfernung zur Pflanze, bei der sie noch nicht in den einzunehmenden Raum eindringen, Einfluss auf das Wachstum. Dieser indirekte Einfluss kann zum Beispiel Schatten sein, welcher im nächsten Abschnitt unter anderem thematisiert wird.

4.4 Lichtverhältnisse

Die Lichtverhältnisse am Standort der Pflanze haben einen großen Einfluss auf ihr Erscheinungsbild [32]. Licht ist eine notwendige Voraussetzung für die Photosynthese, welche im ersten Unterabschnitt stark vereinfacht beschrieben wird. Dafür ist das Licht der Sonne notwendig, weswegen der Verlauf der Sonne und eine Möglichkeit

zur Modellierung in Unterabschnitt 4.4.3 vorgestellt werden. Ohne die Photosynthese könnte die Pflanze nicht wachsen und sich nicht entwickeln. Aufgrund dieses großen Einflusses zeigen Pflanzen Reaktionen, mit denen die Lichtgewinnung maximiert werden kann [21]. Diese Reaktionen haben ebenfalls Einfluss auf den Phänotyp der Pflanze und werden in Unterabschnitt 4.4.4 beschrieben. In den Unterabschnitten 4.4.5 und 4.4.6 werden die Auswirkungen dieser Einflüsse in die Modellierung integriert.

4.4.1 Wachstum von Pflanzen durch Photosynthese

Die Photosynthese ist von vielen Umweltfaktoren abhängig und bildet die Lebensgrundlage der Pflanzen, da sie für die gesamte Entwicklung und das Wachstum notwendig ist [32].

Die Photosynthese besteht aus der Lichtreaktion, bei der die Energie des Sonnenlichts, durch bestimmte Zellorganellen in den Blättern, in chemische Energie umgewandelt wird und der Dunkelreaktion, bei der die chemische Energie aus der Lichtreaktion genutzt wird um Glucose herzustellen [3].

Die Glucose wird von der Pflanze zu Stärke umgebaut und gelagert, oder mit Mineralien, die aus der Erde aufgenommen werden, zu Stoffen umgewandelt, die die Pflanze unter anderem für das Wachstum braucht. Die eingelagerte Stärke wird nachts umgewandelt und für das Wachstum benutzt, wenn wegen der Dunkelheit keine Photosynthese betrieben werden kann [10]. Das Pflanzenwachstum findet zu einem Großteil in der Nacht statt, wobei kurz vor der Morgendämmerung der Höhepunkt erreicht wird [10]. Dieser Rhythmus aus Sammeln von Energie am Tag und Umsetzung durch Wachstum in der Nacht wird in Unterabschnitt 4.4.6 für die Generierung relevant.

Pflanzen befinden sich ein Leben lang im Wachstum [17]. Das Wachstum erfolgt durch bestimmte Wachstumszonen, die aus undifferenzierten Zellen bestehen, welche sich durch Zellteilung vermehren. Diese sogenannten Meristeme kommen unter anderem an Knospen und den Spitzen von Ästen vor. An diesen Stellen findet das Wachstum und damit die Anpassungen an die Lichtverhältnisse statt. Wie die Lichtverhältnisse erkannt werden und welche Effekte bei der Anpassung auftreten, wird in Unterabschnitt 4.4.4 thematisiert.

Die Anpassung an die Umgebung hat Auswirkungen auf das Erscheinungsbild einer Pflanze und ist für diese besonders relevant, da sie an ihren Standort gebunden ist. Besonders im Bezug auf den Zugang zu Ressourcen, die räumlich und zeitlich nicht immer zur Verfügung stehen, wie zum Beispiel das Licht, ist diese Anpassung wich-

tig [32]. Die Anpassung an die Lichtverhältnisse maximiert die Möglichkeiten der Pflanze Licht aufzunehmen [21]. Da das Licht der Sonne eine notwendige Energiequelle der Pflanzen ist, ist diese Anpassung ausschlaggebend für die Erscheinung. In den folgenden Unterabschnitten werden die Rezeption der Lichtverhältnisse und die daraus resultierenden Reaktionen der Pflanze untersucht. Um den Realismus der generierten Modelle zu erhöhen werden Perzeption und Reaktionen anschließend modelliert und in die Generierung integriert. Dafür werden zunächst die möglichen Lichtquellen von Pflanzen thematisiert.

4.4.2 Lichtquellen

In der Zivilisation und vor allem in urbanen Gebieten kommt zu dem Licht der Sonne Licht aus künstlichen Quellen, wie zum Beispiel Straßenlaternen, hinzu. Dieses Licht kann die natürlichen Rhythmen der Pflanzen stören, was zum Beispiel dazu führen kann, dass im Frühling die Blütezeit früher beginnt, oder im Herbst die Blätter von Bäumen erst später abgeworfen werden [2]. Diese Unterschiede können starke Auswirkungen haben, zum Beispiel wenn verfrüht ausgebildete Blüten durch Frost beschädigt werden. Die Störung dieser Rhythmen kann ebenfalls das Zusammenspiel zwischen Pflanzen und ihren Bestäubern beeinflussen, die eine wichtige Rolle für die Fortpflanzung spielen [2]. Diese Lichtquellen zu integrieren würde eine Szene und die erzeugten Modelle noch realistischer machen, ist jedoch nicht Gegenstand der Betrachtung dieser Arbeit.

Das Licht der Sonne hat eine wesentlich höhere Intensität und dadurch einen größeren Einfluss auf das Wachstum einer Pflanze und ihre Entwicklung. In diesem Abschnitt wird deswegen der Einfluss des Sonnenlichts auf das Wachstumsverhalten untersucht und in die Generierung integriert. Das Sonnenlicht steht nicht permanent zur Verfügung, sondern unterliegt täglichen und jährlichen Rhythmen, die sich durch die Rotation der Erde und die relative Bewegung von Erde und Sonne zueinander ergeben. Deshalb wird zunächst der Verlauf der Sonne im Bezug auf die Erde beschrieben und vorgestellt, wie die Sonne in der Generierung modelliert werden kann.

4.4.3 Verlauf und Modellierung der Sonne

Um den Einfluss der Lichtverhältnisse in die Generierung mit einzubeziehen, muss bekannt sein, aus welcher Richtung das Licht auf die Szene trifft und an welchen Stellen Schatten geworfen wird. Dafür soll zunächst die Sonnenposition durch Höhen-

und Azimutwinkel angegeben werden. Aus diesen lässt sich der Richtungsvektor der Sonneneinstrahlung berechnen, der für die Erkennung der Lichtverhältnisse bei der Generierung benutzt wird.

Horizontales Astronomisches Koordinatensystem

Der Sonnenstand wird im horizontalen Koordinatensystem der Astronomie durch Höhenwinkel h und Azimutwinkel a angegeben [12]. Höhen- und Azimutwinkel sind Kugelkoordinaten (vgl. Abschnitt 4.2), daher gehört das System zur sphärischen Astronomie [12]. Bei dieser ist der Abstand von Himmelskörpern zur Erde nicht relevant, da die Himmelskörper als eine Projektion auf eine gedachte Himmelskugel, die die Erde umgibt, betrachtet werden. Der Koordinatenursprungspunkt des horizontalen Systems ist dabei der Beobachter und entspricht in der Szenerie dem Ursprung des kartesischen Koordinatensystems. Die Bezugsebene für den Höhenwinkel ist der Horizont, bestehend aus x- und z-Achse, und der Azimut wird von Norden aus über Osten gemessen. Das horizontale Koordinatensystem ist in Abbildung 4.1 bei der Beschreibung der Szenerie zu sehen.

In den örtlichen Breitengraden lässt sich beobachten, dass die Sonne von Osten nach Westen über die gedachte Himmelssphäre wandert, wobei der Azimutwinkel steigt. Dabei steigt der Höhenwinkel zunächst an, um im Süden ungefähr am Mittag sein Maximum zu erreichen und dann wieder zu fallen. Dabei ist der Sonnenaufgang, abhängig von der Jahreszeit, entweder im Nordosten, genau im Osten oder im Südosten. Analog gilt das für den Sonnenuntergang im Westen. Der Höhen- und der Azimutwinkel sind dabei abhängig vom Standpunkt des Betrachters. Da die Sonne nicht wirklich auf der Umlaufbahn kreist, die in diesem System zu sehen ist, werden die Winkel nicht direkt, sondern aus einem anderen Koordinatensystem transformiert.

Äquatoriales astronomisches Koordinatensystem

Dafür wird das rotierende äquatoriale Koordinatensystem benutzt, bei dem die Berechnung abhängig von der Zeit erfolgt und wie beim horizontalen Koordinatensystem Kugelkoordinaten verwendet werden [12]. Der Koordinatenursprung ist dabei der Erdmittelpunkt, weshalb es sich um ein geozentrisches System handelt. Die Sonne kreist zwar auch nicht um den Erdmittelpunkt, aber bei dieser Anschauungsweise kann die Ekliptik zur Berechnung verwendet werden. Das ist die scheinbare Umlaufbahn der Sonne um die Erde [12].

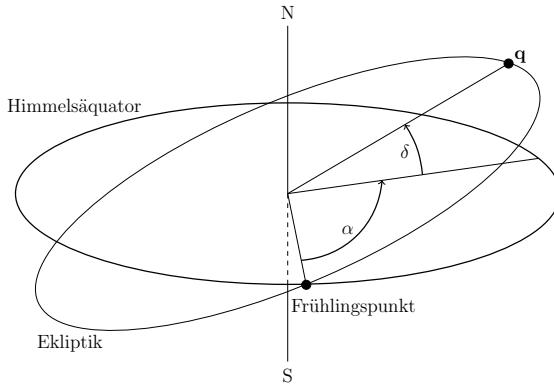


Abbildung 4.4: Das äquatoriale Koordinatensystem ist ein Kugelkoordinatensystem bei dem die Position der Sonne auf der Ekliptik durch Deklination δ und Rektaszension α angegeben wird. Die Deklination ist der vertikale Winkel und wird zwischen Himmelsäquator und der Ekliptik gemessen. Die Rektaszension ist der horizontale Winkel und wird vom Frühlingspunkt aus entlang des Himmelsäquators gemessen. Modifiziert nach [35, 40].

Der vertikale Winkel der äquatorialen Koordinaten ist die Deklination δ , die dem Winkel zwischen Himmelsäquator und Ekliptik entspricht (siehe Abbildung 4.4). Der Himmelsäquator ist eine Projektion des Äquators aus der Erde heraus auf die gedachte Himmelskugel.

Wäre die Erdachse senkrecht zur Umlaufbahn um die Sonne, würde die Ekliptik dem Himmelsäquator entsprechen, und die Sonne würde aus geozentrischer Sicht genau auf dem Himmelsäquator kreisen. Die Erdachse weist aber eine Schiefe von circa 23,5 Grad auf, sodass der Winkel zwischen Ekliptikebene und Äquatorebene 23,5 Grad beträgt [12]. Um diesen Wert weicht die Deklination der Sonnenposition maximal nach oben oder unten von 0 Grad ab und es resultieren daraus die Jahreszeiten. Zu Beginn von Frühling und Herbst kreuzt die Sonne den Himmelsäquator bei 0 Grad Deklination, wodurch zwei Schnittpunkte zwischen der Ekliptik und dem Himmelsäquator entstehen. Der Schnittpunkt an dem sich die Sonne zum Frühlingsanfang befindet wird Frühlingspunkt genannt [12].

Der horizontale Winkel des äquatorialen Systems ist die Rektaszension α . Diese wird vom Frühlingspunkt aus entlang des Himmelsäquators gemessen (siehe Abbildung 4.4).

Sei j die Nummer des Tages eines Jahres, sodass $j = 1$ für den ersten Januar und $j = 365$ (beziehungsweise $j = 366$ für ein Schaltjahr) am 31. Dezember. Der Tageswinkel der Sonne j' , der für die Berechnung der Deklination notwendig ist,

kann dann mit Hilfe von j als

$$j' = 2\pi j / 365, 25 \quad (4.4)$$

approximiert werden [16].

Die Deklination δ_j für den Tag j kann dann durch die Gleichung

$$\delta_j = \arcsin(0,3978 \cdot \sin(j' - 1,4 + 0,0355 \cdot \sin(j' - 0,0489))) \quad (4.5)$$

approximiert werden [16]. Für die Transformation in das horizontale System wird die Rektaszendenz α nur benötigt um den Stundenwinkel t' zu berechnen. Da dieser hier durch die Formel

$$t' = 0,261799(t - 12) \quad (4.6)$$

approximiert wird, wobei t der Stunde des Tages entspricht, wird α nicht benötigt [16].

Transformation der Koordinatensysteme

Die Sonnenposition \mathbf{s}_t eines Zeitpunktes t kann vom äquatorialen ins horizontale Koordinatensystem umgerechnet werden. Dafür werden Höhe h_t und Azimut a_t mit der geografischen Breite ϕ des Beobachtungspunktes durch die Gleichungen

$$h_t = \arcsin(\sin(\phi) \cdot \sin(\delta_j) + \cos(\phi) \cdot \cos(\delta_j) \cdot \cos(t')) \quad (4.7a)$$

$$a_t = \arccos\left(\frac{\cos(\phi) \cdot \sin(\delta_j) - \cos(\delta_j) \cdot \sin(\phi) \cdot \cos(t')}{\cos(h_t)}\right) \quad (4.7b)$$

berechnet [16].

Der Längengrad des Standorts des Beobachters muss nur berücksichtigt werden, wenn die Sonnenposition für eine bestimmte Ortszeit berechnet werden soll. In dieser Arbeit wird allerdings nicht die Position der Sonne zu bestimmten lokalen Uhrzeiten benötigt, sondern zu verschiedenen Tageszeiten.

In den gezeigten Beispielen wurde als Breitengrad ϕ exemplarisch 51,51494, der Breitengrad der Dortmunder Innenstadt, gewählt.

Aus Azimut- und Höhenwinkel einer Sonnenposition \mathbf{s}_t lässt sich dann die Richtung

der Sonnenstrahlen als der Richtungsvektor

$$\mathbf{r}_t = \begin{pmatrix} \sin(a_t) \cdot \cos(h_t) \\ \sin(h_t) \\ -(\cos(a_t) \cdot \cos(h_t)) \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

berechnen [24].

4.4.4 Perzeption der Lichtverhältnisse und Phototropismus

Durch den festen Standort ist es für Pflanzen notwendig, die Anpassung an ihre Umgebung zu optimieren. Dazu gehört auch die Anpassung des Wachstums an die Lichtverhältnisse ihrer Umgebung. Die Veränderung der Wachstumsrichtung einer Pflanze als Reaktion auf eine Lichtquelle wird Phototropismus genannt [32]. Da Pflanzen für das Überleben und alle biologischen Prozesse Energie benötigen, die sie bei der Photosynthese vom Sonnenlicht aufnehmen, gehört es zur optimalen Anpassung an ihren Standort ihren Ertrag an Licht zu maximieren. Die Reaktionen die Pflanzen zeigen, um aus dem Schatten heraus in Richtung des Lichts zu wachsen nennt man Schattenflucht. Die Schattenflucht soll in die Generierung der Baummodelle eingebracht werden. Um eine Reaktion auf einen Reiz zeigen zu können, muss der Reiz aber zunächst erkannt werden.

Perzeption der Lichtverhältnisse

Pflanzen haben dafür sogenannte Photo-Rezeptoren, mit denen sie die Richtung, Intensität und Qualität von Licht messen können [32]. Die größte Konzentration dieser Rezeptoren befindet sich in undifferenzierten Geweben, zum Beispiel an Sprossen und Wurzeln [32]. An diesen findet das Wachstum statt, sodass bei diesen Stellen die Anpassungen an die Lichtverhältnisse relevant sind. Bei der Generierung sollen die Lichtverhältnisse deshalb an den Stellen gemessen werden, an denen das Modell bei einem Generierungsschritt wächst, damit das Wachstum dort entsprechend angepasst werden kann. Das Wachstums entspricht bei der Generierung dem Hinzufügen von Knoten und entsprechenden Kanten zum Baum $G = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$. Diese Knoten werden so positioniert, dass der Baum in einen durch eine Punktwolke \mathcal{P} approximierten Raum hineinwächst. Die Funktion $\mathcal{M}(\mathbf{v})$ bildet einen Knoten \mathbf{v} auf die Punkte aus \mathcal{P} ab, die eine anziehende Wirkung auf \mathbf{v} haben (vgl. Unterabschnitt 3.5.1). An einem Knoten $\mathbf{v}_i \in \mathcal{V}$ für den gilt $\mathcal{M}(\mathbf{v}_i) = \emptyset$ findet kein Wachstum statt. Die Stellen

an denen Wachstum stattfindet werden durch die Menge

$$\mathcal{K} = \{\mathbf{v}_i \mid \mathcal{M}(\mathbf{v}_i) \neq \emptyset\} \quad (4.9)$$

modelliert.

Reaktionen auf die Lichtverhältnisse in der Umgebung

Die Signalübertragung erfolgt bei Pflanzen und ihren Zellen über chemische Prozesse [32]. So löst die Erkennung der Lichtverhältnisse Reaktionen aus, die das Wachstum beeinflussen.

Die Reaktionen die zur Schattenflucht gehören sind unter anderem schnelleres Längenwachstum, weniger Verzweigungen und das Ausbilden von Ästen statt von Blättern, Blüten oder Früchten [32, 42]. Das führt dazu, dass auf der Schattenseite des Baumes weniger Verzweigungen, und daraus resultierend weniger Äste und Zweige wachsen, während auf der Sonnenseite mehr Äste, Zweige und auch Organe wie Blätter und Blüten zu finden sind. Die Wachstumsrichtung wird als Reaktion auf die lokalen Lichtverhältnisse ebenfalls angepasst. Einseitige Belichtung wird von der Pflanze an den Stellen an denen Wachstum stattfindet wahrgenommen und führt zur Umverteilung des Wachstumshormons Auxin, sodass ein Gradient entsteht mit einem Übergang von mehr Auxin auf der dunkleren Seite zu weniger auf der helleren Seite [21]. Das Wachstum wird dadurch auf der dunkleren Seite gefördert, was zu ungleichmäßigem Wachstum und der Neigung in Richtung der Lichtquelle führt. Dabei entscheidet der Kontrast zwischen der helleren und der dunkleren Seite über die Stärke dieser Auswirkungen. In einer Szene, in der Licht ausschließlich aus einer Richtung kommt und kaum von der Umgebung reflektiert wird, ist die Auswirkung wesentlich größer als in einer Szene in der Licht aus mehreren Richtungen auf die Pflanze einwirkt oder reflektiert wird.

Die Neigung der Pflanze und die veränderte Verteilung der Äste sollen beim Modell entsprechend der Lichtverhältnisse sichtbar werden, um den Realismus durch die Anpassung an die Umgebung zu erhöhen. Bei Pflanzen gehen diese Veränderungen von dem Auxin-Gradienten aus, der aus der Messung der Lichtverhältnisse resultiert, deshalb soll dieser nachfolgend modelliert werden.

Die Richtung des Gradienten vom Maximum an Auxin zum Minimum an einem Knoten $\mathbf{v}_i \in \mathcal{K}$ wird durch einen Vektor $\mathbf{b}_{i,t}$ modelliert. Dieser zeigt für eine Sonnenposition \mathbf{s}_t von der dunkelsten Seite des Knotens in Richtung der hellsten Seite.

In der Modellierung unterscheidet sich die Berechnung von $\mathbf{b}_{i,t}$ für den Knoten \mathbf{v}_i je nachdem, ob er in der Sonne oder im Schatten liegt. Hindernisse können den Weg der Sonnenstrahlen blockieren und einen Schatten auf die Pflanze werfen. Um herauszufinden, ob \mathbf{v}_i im Schatten liegt oder nicht, wird der Richtungsvektor \mathbf{r}_t der Sonnenstrahlen zu einer gegebenen Sonnenposition \mathbf{s}_t benötigt. Mit diesem wird die Strecke

$$g_{t,i} := \mathbf{v}_i + u \cdot \mathbf{r}_t, \text{ mit } u >= 0, \quad (4.10)$$

die in Richtung der Sonnenstrahlen durch \mathbf{v}_i verläuft, mit allen Hindernissen geschnitten. Wenn es mit mindestens einem der Hindernisse einen Schnittpunkt gibt, dann liegt \mathbf{v}_i im Schatten.

Falls \mathbf{v}_i nicht im Schatten liegt entspricht die Stelle des Knotens, die der Sonne zugewandt der hellsten Stelle. Deswegen entspricht $\mathbf{b}_{i,t}$ in diesem Fall dem negativen Richtungsvektor der Sonnenstrahlen (siehe Gleichung 4.16).

Falls \mathbf{v}_i im Schatten liegt soll das Wachstum so modelliert werden, dass die Pflanze zum Licht hin beziehungsweise vom Schatten weg wächst. Diesen Vektor genau zu berechnen wäre komplex, da zum Beispiel Reflexionen des Lichts von anderen Hindernissen und dem Boden abhängig vom Material miteinkalkuliert werden müssten. Der Vektor wird aus Gründen der Vereinfachung im Folgenden approximiert.

Dafür wird zunächst der geometrische Schwerpunkt des Hindernisses projiziert auf die Grundfläche berechnet. Sei $B_l = (\mathbf{c}_{l,1}, \mathbf{c}_{l,2})$ ein in Unterabschnitt 4.3.1 beschriebenes Gebäude, dann wird dieser Schwerpunkt \mathbf{c}_l mit der Gleichung

$$\mathbf{c}_l = \begin{pmatrix} (x_{l,1} + x_{l,2})/2 \\ 0 \\ (z_{l,1} + z_{l,2})/2 \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

berechnet [30]. Dieser Punkt wird als Approximation der dunkelsten Stelle des Hindernisses verwendet.

Da $\mathbf{b}_{i,t}$ von der dunkleren Seite in Richtung der helleren Seite zeigen soll, kann in Betracht gezogen werden den Vektor

$$\mathbf{r}_{l,i} = \mathbf{v}_i - \mathbf{c}_l, \quad (4.12)$$

der vom Schwerpunkt von B_l in Richtung von \mathbf{v}_i zeigt, als Vektor $\mathbf{b}_{i,t}$ zu benutzen. In Abbildung 4.5 ist eine Szene zu sehen, in der ein Gebäude als Hindernis, ein Baum und die Richtung der Sonnenstrahlen \mathbf{r}_t einer Sonnenposition \mathbf{s}_t von der Seite zu sehen sind. Die Fläche die im Schatten liegt ist in hellgrau dargestellt. Die Grenzen

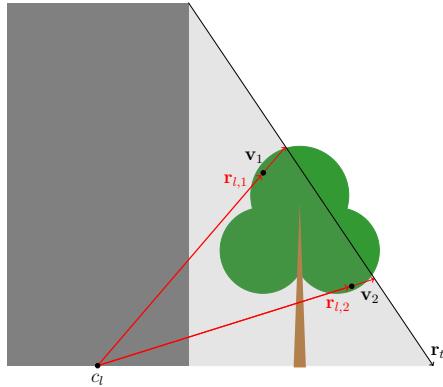


Abbildung 4.5: Für einen Knoten des Baumskeletts soll ein Richtungsvektor bestimmt werden, der vom Schatten weg und hin zum Licht zeigt. Der Vektor $\mathbf{r}_{l,i}$ zeigt vom Schwerpunkt der Grundfläche des Hindernisses \mathbf{c}_l zum Knoten \mathbf{v}_i . Dieser Vektor zeigt zwar vom Schatten weg, jedoch zeigt er nicht auf optimalem Weg zum Licht hin. Dafür müsste der Vektor senkrecht zur Schattenkante sein, aber umso größer der horizontale Abstand von \mathbf{v}_i vom Mittelpunkt des Hindernisses ist, desto mehr weicht der Winkel zur Schattenkante von 90 Grad ab. Dadurch würde es bei der Generierung zu einem verzerrten Wachstum kommen.

des Schlagschatten werden idealisiert als klare Kanten betrachtet. Der Vektor $\mathbf{r}_{l,i}$ ist für zwei Knoten \mathbf{v}_1 und \mathbf{v}_2 jeweils in rot eingezeichnet und es ist zu sehen, dass die Richtung nicht optimal ist, da es kürzere Wege vom Knoten zur Schattenkante gibt. Das ist vor allem bei Knoten der Fall, deren y-Koordinate stark von der mittleren Höhe des Hindernisses abweicht. Des Weiteren ist er nicht abhängig von der Richtung der Sonnenstrahlen, obwohl diese bestimmen wo die dunkelste und wo die hellste Stelle des Knotens ist.

Der Vektor $\mathbf{b}_{i,t}$ soll so berechnet werden, dass er in entgegengesetzte Richtung vom Schatten zeigt, aber auch angepasst an die Richtung der Sonnenstrahlen ist, um den Gradienten besser zu approximieren. Dafür wird zunächst der Hilfsvektor

$$\mathbf{h}_i = \mathbf{r}_{l,i} \times \mathbf{r}_t \quad (4.13)$$

berechnet, welcher senkrecht zu $\mathbf{r}_{l,i}$ und \mathbf{r}_t ist [14]. Dieser Hilfsvektor bildet mit \mathbf{r}_t eine Ebene, mit der der Vektor

$$\mathbf{r}_{t,i} = \mathbf{h}_i \times \mathbf{r}_t \quad (4.14)$$

berechnet werden kann, mit dem eine Gerade konstruierbar ist, die durch \mathbf{v}_i verläuft

und die Gerade

$$g_{l,i} = \mathbf{c}_l + u \cdot \mathbf{r}_t, \quad (4.15)$$

welche in Richtung der Sonnenstrahlen durch den projizierten Schwerpunkt des Gebäudes verläuft, senkrecht schneidet.

In Abbildung 4.6 ist die gleiche Szene abgebildet wie in Abbildung 4.5. Hier ist die Gerade $g_{l,i}$ eingezeichnet und der Vektor $\mathbf{r}_{t,i}$ für die beiden Knoten \mathbf{v}_1 und \mathbf{v}_2 . Der Vektor $\mathbf{r}_{t,i}$ liegt senkrecht zu \mathbf{r}_t , wodurch der Abstand zur Schattenkante von \mathbf{v}_i im Vergleich zu Abbildung 4.5 kürzer ist. Der Vektor $\mathbf{r}_{t,i}$ ist eine für den Zweck geeignete Approximation für den Gradienten an einem Knoten und wird deshalb, für den Fall, dass \mathbf{v}_i im Schatten liegt als $\mathbf{b}_{i,t}$ verwendet.

Damit ergibt sich insgesamt die Gleichung

$$\mathbf{b}_{i,t} = \begin{cases} -\mathbf{r}_t & , \text{ wenn } \mathbf{v}_i \text{ in der Sonne liegt} \\ \mathbf{r}_{t,i} & , \text{ wenn } \mathbf{v}_i \text{ im Schatten liegt} \end{cases} \quad (4.16)$$

für den Richtungsvektor $\mathbf{b}_{i,t}$, der den Gradienten modelliert.

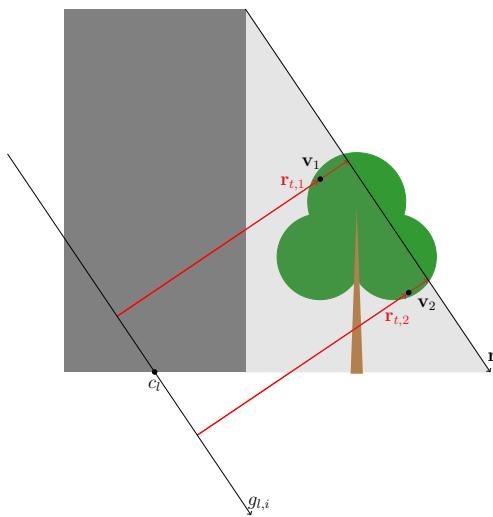


Abbildung 4.6: Für einen Knoten des Baumskeletts soll ein Richtungsvektor bestimmt werden, der vom Schatten weg und hin zum Licht zeigt. Der Vektor $\mathbf{r}_{t,i}$ ist im Gegensatz zum Vektor $\mathbf{r}_{l,i}$ (vgl. Abbildung 4.5) senkrecht zu den Sonnenstrahlen \mathbf{r}_t , und dadurch von der Sonnenposition abhängig. Dadurch zeigt er für einen Knoten \mathbf{v}_i von seiner schattigen Seite aus in Richtung der helleren Seite und kann für die Generierung verwendet werden, wenn \mathbf{v}_i im Schatten liegt.

4.4.5 Statische Lichtquellen

Um das Wachstum des Baumes während der Generierung an die Lichtverhältnisse anzupassen, soll die Punktwolke bei jedem Wachstumsschritt in Richtung der helleren Seite vom Baum aus verschoben werden.

Zunächst wird dafür eine Szene mit einer beliebigen, festen Sonnenposition \mathbf{s}_t als statische Lichtquelle betrachtet. Bei einem Wachstumsschritt liegt für alle Knoten $\mathbf{v}_i \in \mathcal{K}$ der Richtungsvektor $\mathbf{b}_{i,t}$ für den Gradienten vor, welcher von der dunkleren Seite aus in Richtung der helleren Seite zeigt. Aus den Gradienten der einzelnen Knoten wird der Gradient des gesamten Baumes im Bezug auf die Lichtquelle \mathbf{s}_t als Richtungsvektor

$$\mathbf{b}_t = \sum_{i=1}^{|\mathcal{K}|} \mathbf{b}_{i,t} \quad (4.17)$$

berechnet.

Sei \mathcal{P} die Punktwolke aus dem vorherigen Schritt der Generierung. Um das Wachstum in die entsprechende Richtung zu lenken wird die Punktwolke in Richtung von \mathbf{b}_t verschoben, indem zu jedem Attraction Point $\mathbf{p}_k \in \mathcal{P}$ der Richtungsvektor \mathbf{b}_t addiert wird. So ergibt sich die neue Punktwolke

$$\mathcal{P}_t = \{\mathbf{p}_{k,t} \mid \mathbf{p}_{k,t} = \mathbf{p}_k + \langle \mathbf{b}_t \rangle \cdot o \wedge \mathbf{p}_k \in \mathcal{P}\}, \quad (4.18)$$

die für den aktuellen Wachstumsschritt, angepasst an die statische Lichtquelle \mathbf{s}_t verschoben ist. Der Faktor o bestimmt dabei als Parameter über die Stärke des Einflusses der Lichtverhältnisse auf das gesamte Wachstum, weil von ihm abhängig ist, wie weit die Punktwolke verschoben werden.

In Abbildung 4.7 sind zum Vergleich vier Baummodelle zu sehen. Die Richtung der Sonnenstrahlen ist durch gelbe Pfeile dargestellt. Um die Größe der Bäume verglichen zu können, ist ein Maßstab abgebildet. In Abbildung 4.7(a) ist zum Vergleich ein Modell zu sehen, das ohne die Berücksichtigung der Lichtverhältnisse, also ohne die Punktwolke zu verschieben, generiert wurde. Die Äste und Verzweigungen sind gleichmäßig auf beiden Seiten des Stammes vorhanden und weisen keine auffällige primäre Richtung auf. Das Modell in Abbildung 4.7(b) wurde mit Verschiebung der Punktwolke mit dem Faktor $o = d/5$ generiert. Bei diesem Modell sind die Äste und der gesamte Baum der Sonne zugeneigt. Die Form der Baumkrone ist bei der angepassten Generierung nach wie vor rundlich und es sind einzelne Verzweigungen wieder zu erkennen. Der Stamm des Baumes ist ebenfalls zur Sonne geneigt, aber nicht so stark wie die Krone, sodass er relativ gerade bis zur Spitze des Baumes mit-

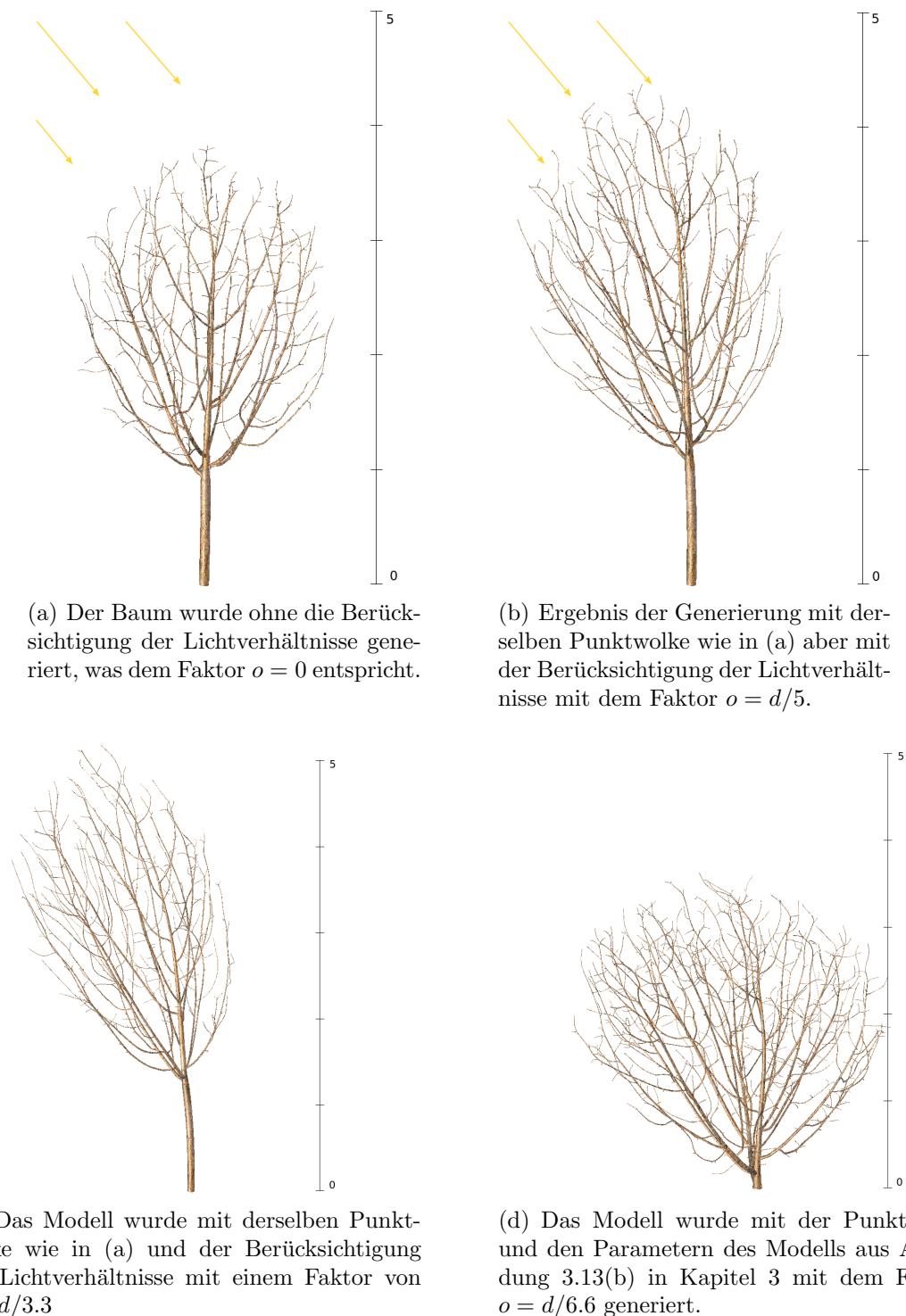
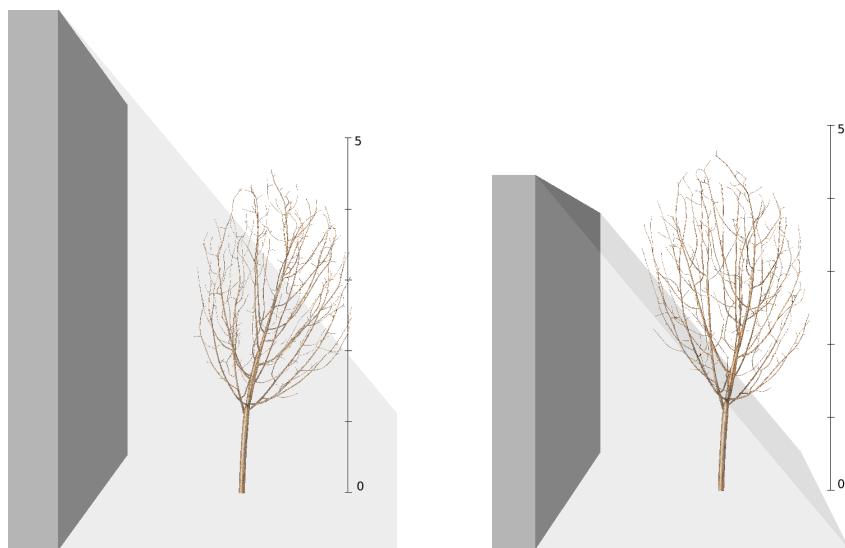


Abbildung 4.7: In einer Szene mit einer statischen Lichtquelle, in der das Licht der Sonne von links in einem Winkel von 50 Grad über dem Horizont einfällt, verdeutlicht durch gelbe Pfeile in (a) und (b), wurde jeweils ein Baummodell generiert. Die Größe des Baumes ist am Maßstab in Metern ablesbar.

tig verläuft. Dadurch befinden sich auf der Sonnenseite der Krone, vom Stamm aus gesehen mehr Äste und Verzweigungen als auf der Schattenseite. Durch die Verschiebung ist die Baumkrone in die Länge gezogen worden und der Baum ist insgesamt größer. Das Modell in Abbildung 4.7(c) wurde mit der gleichen Punktwolke wie die Modelle in Abbildung 4.7(a) und 4.7(b) aber mit dem Faktor $o = d/3.3$ generiert. Die Effekte der Anpassung an die Lichtverhältnisse sind dadurch deutlicher sichtbar. Das Modell in Abbildung 4.7(d) wurde mit einer anderen Punktwolke generiert und stellt einen anderen Typ Baum dar. Die Punktwolke entspricht dabei der des Modells aus Abbildung 3.13(b) in Kapitel 3. Als Faktor wurde $o = d/6.6$ gewählt und die Neigung des Baumes ist vor allem an den Astspitzen im oberen Bereich der Krone erkennbar.

Der indirekte Einfluss von Hindernissen durch Schattenwurf wird durch die angepasste Generierung mit Verschiebung der Punktwolke berücksichtigt, da bei der Berechnung der Gradienten die Hindernisse einbezogen werden. In Abbildung 4.8 wurde die Szene aus der vorherigen Abbildung um ein Gebäude als Hindernis ergänzt. Das Gebäude wurde so platziert, dass es keine Überschneidung mit der Punktwolke gibt,



(a) Das Gebäude hat eine Höhe von 6 Metern. Mehr als die Hälfte der Baumkrone befindet sich im Schatten.

(b) Das Gebäude hat eine Höhe von 4 Metern. Nur der Stamm des fertigen Baummodells befindet sich im Schatten.

Abbildung 4.8: Zu der in Abbildung 4.7 verwendeten Szene wurde ein Gebäude als Hindernis hinzugefügt. Der Schatten des Gebäudes ist in hellgrau dargestellt. Die Entfernung des Hindernisses wurde so gewählt, dass es keine Überscheidung mit der Punktwolke gibt.

sodass die Auswirkungen der Lichtverhältnisse isoliert betrachtet werden können. Der Schatten des Gebäudes ist durchscheinend in hellgrau abgebildet und durch die seitliche Perspektive ist die obere Schattenkante zu erkennen. In Abbildung 4.8(a) ist das Gebäude sechs Meter hoch. Das Modell ist unterhalb der Schattenkante vom Hindernis weg, und damit in Richtung der lokal hellsten Seite, geneigt. Oberhalb der Schattenkante neigen sich die Äste in die entgegengesetzte Richtung, zur Lichtquelle hin. In Abbildung 4.8(b) wurde ein Hindernis mit einer Höhe von vier Metern gewählt. Dadurch ist von dem Modell lediglich der Stamm im Schatten, welcher leicht vom Gebäude weg geneigt ist. Die Krone befindet sich fast vollständig oberhalb der Schattenkante und wächst in Richtung der Lichtquelle. Für eine statische Lichtquelle wachsen die generierten Bäume zur lokal helleren Seite hin.

Die Lichtverhältnisse von echten Pflanzen werden allerdings nicht durch genau eine statische Lichtquelle bestimmt. Die Position der Sonne verändert sich über den Tag, sodass der anziehende Einfluss des Lichts sich auf mehrere Richtungen aufteilt.

4.4.6 Dynamische Lichtquellen

Durch die relative Bewegung von Erde und Sonne zueinander ist die Sonne eine dynamische Lichtquelle. Das Verhalten der Pflanzen ist an die festen Rhythmen des Verlaufs der Sonne angepasst, entspricht also ebenfalls einem festen Rhythmus. Die Rhythmen der Pflanzen, die eine ungefähre Länge von 24 Stunden haben werden *circadiane* Rhythmen genannt und werden unter anderem durch Proteine und Genetik aber auch durch Reaktionen auf die Lichtverhältnisse gesteuert [18]. Zum Beispiel können Blätter sich am Tag der Sonne zuwenden, wodurch die Menge des umgesetzten Lichts optimiert werden kann [18]. Ein Tagesablauf wird in der Generierung so modelliert, dass die Umverteilung des Auxins über den Tag abhängig von den Sonnenpositionen akkumuliert wird, und anschließend ein Wachstumsschritt in die angepasste Richtung, entsprechend des nächtlichen Wachstums, ausgeführt wird.

Dafür muss zunächst der Verlauf der Sonne über den Tag in die Generierung eingebracht werden. Der stetige Verlauf der Sonne wird dafür diskretisiert, indem für einen Tag j (vgl. Unterabschnitt 4.4.3) mit einem festen zeitlichen Abstand d_t von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang die Position der Sonne berechnet wird. Dafür wird zuerst der Stundenwinkel der Sonnenposition beim Sonnenaufgang t'_a und beim Sonnenuntergang t'_u berechnet, um aus diesem jeweils die Zeit zu berechnen [16]. Für die Stundenwinkel gilt

$$t'_a = t'_u = \arccos(-\tan(\phi) \cdot \tan(\delta_j)). \quad (4.19)$$

Die Zeit des Sonnenaufgangs t_a und des Sonnenuntergangs t_u werden dann durch die Formeln

$$t_a = 12 + t'_a / 0,261799 \quad (4.20a)$$

$$t_u = 12 - t'_u / 0,261799 \quad (4.20b)$$

berechnet [16]. In der Menge

$$\mathcal{S}_j = \{\mathbf{s}_t \mid t_a \leq t \leq t_u \wedge t \bmod t_d = 0\} \quad (4.21)$$

sind alle Sonnenpositionen an Tag j von Sonnenaufgang t_a bis Sonnenuntergang t_u mit dem Abstand d_t enthalten.

Für alle Knoten \mathbf{v}_i aus \mathcal{K} kann der Vektor $\mathbf{b}_{i,t}$, der den Gradienten widerspiegelt, berechnet werden. Für einen Knoten \mathbf{v}_i liegt wegen der dynamischen Lichtquelle \mathcal{S}_j nicht, wie bei einer statischen Lichtquelle, nur ein Richtungsvektor vor, sondern es gibt $|\mathcal{S}_j|$ Vektoren, einen pro Sonnenposition $\mathbf{s}_t \in \mathcal{S}_j$. Der Richtungsvektor für den Knoten \mathbf{v}_i und die Sonnenposition \mathbf{s}_t wird als $\mathbf{b}_{i,t}$ bezeichnet. Für einen Tag j liegt dann für jeden Knoten $\mathbf{v}_i \in \mathcal{K}$ eine Menge von Gradienten $\mathbf{b}_{i,t} \in \mathcal{B}_{i,j}$, entsprechend der Sonnenpositionen $\mathbf{s}_t \in \mathcal{S}_j$.

Da der Gradient der realen Pflanze sich über den Tag hinweg entwickelt, sollen alle Vektoren aufaddiert werden, um die durchschnittliche Richtung zu erhalten.

Dabei ist der Einfluss des Lichts nicht immer gleich stark, sondern hängt von der Intensität ab, da der Kontrast zwischen heller und dunkler Seite entscheidend ist. Die Intensität des Lichts hängt von der Sonnenposition \mathbf{s}_t ab und wird durch ihren Höhenwinkel h_t modelliert. Deshalb werden bei der Berechnung des Gradienten an einem Knoten \mathbf{v}_i alle Vektoren $\mathbf{b}_{i,t}$ mit dem Höhenwinkel h_t der Sonnenposition \mathbf{s}_t gewichtet. Insgesamt wird der Gradient eines Knoten \mathbf{v}_i bei der Betrachtung einer dynamischen Lichtquelle durch die Gleichung

$$\mathbf{b}_{i,j} = \sum_{t=1}^{|\mathcal{S}_j|} \mathbf{b}_{i,t} \cdot h_t \quad (4.22)$$

berechnet.

Der Gradient

$$\mathbf{b}_j = \sum_{i=1}^{|\mathcal{K}|} \mathbf{b}_{i,j} \quad (4.23)$$

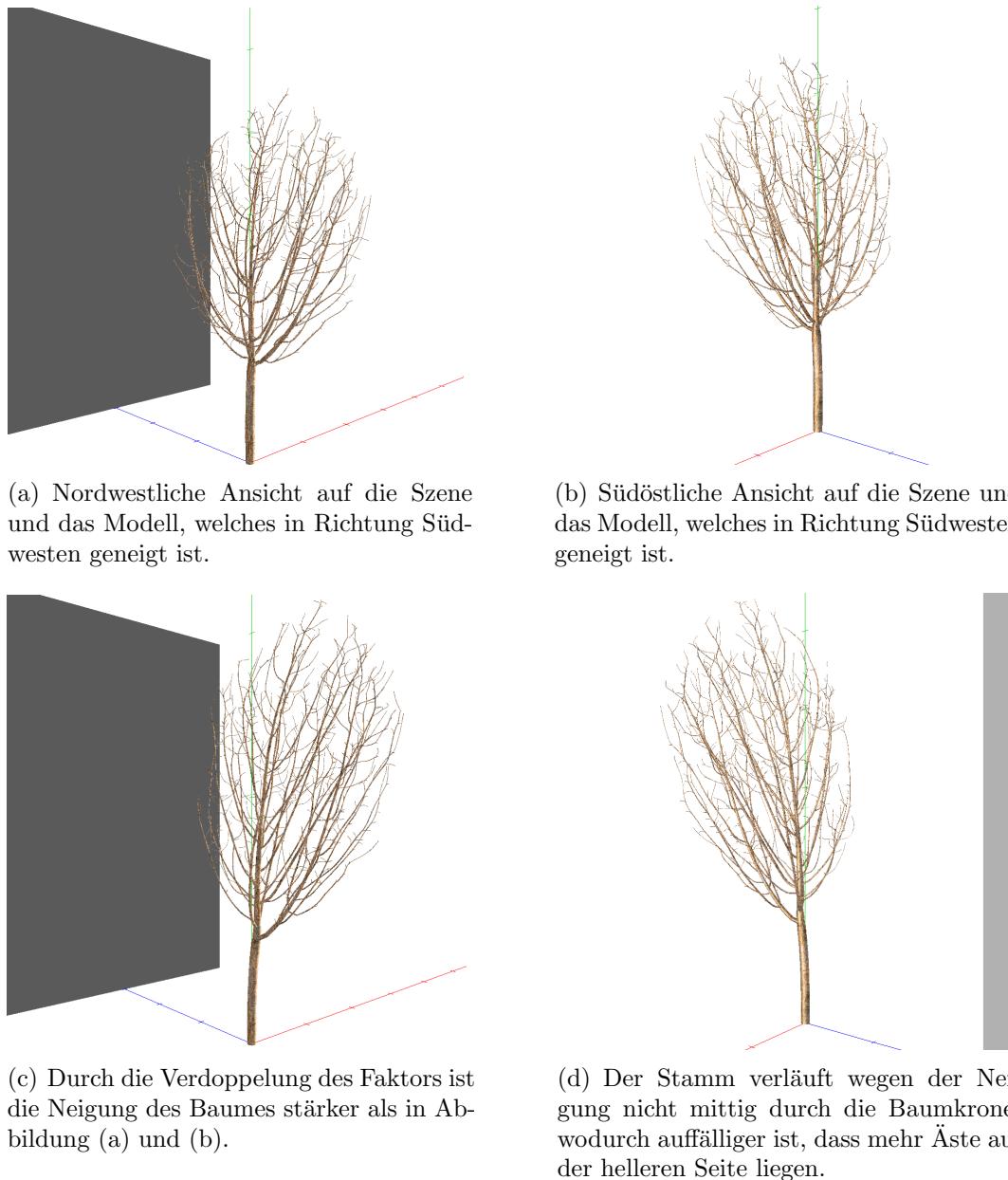


Abbildung 4.9: Ergebnisse der Generierung in einer Szene mit einer dynamischen Lichtquelle. Die x-Achse des kartesischen Koordinatensystems ist in blau, die y-Achse in grün und die z-Achse in rot abgebildet. In Richtung Osten befindet sich ein Gebäude als Hindernis, das die Einstrahlung der Sonne aus dieser Richtung verdeckt. In Abbildung (a) und (b) wurde als Faktor $o = d/6.6$ verwendet, während in Abbildung (c) und (d) $o = d/3.3$ gilt.

des gesamten Baumes für den Tag j wird für eine dynamische Lichtquelle als Addition der Gradienten $\mathbf{b}_{i,j}$ aller Knoten $\mathbf{v}_i \in \mathcal{K}$ berechnet.

In Abbildung 4.9 ist eine Szene mit einem Hindernis und einer dynamischen Lichtquelle dargestellt. Die Koordinatenachsen sind farbig eingezeichnet, die blaue x-Achse zeigt in Richtung Osten und die rote z-Achse in Richtung Süden. Die Modelle in den oberen Abbildungen wurden mit einem Faktor von $o = d/6.6$ generiert. Im Vergleich zu den Modellen in Abbildung 4.8, sind die Bäume wegen der dynamischen Lichtquelle nicht nur in Richtung Osten beziehungsweise Westen geneigt, sondern nach Südwesten. Das resultiert daraus aus dem Gebäude, dass von Osten Schatten wirft und dem Verlauf der Sonne. Wegen dem Gebäude wird die Punktwolke in Richtung Westen verschoben. Durch den Verlauf der Sonne von Osten nach Westen, mit dem höchsten Stand im Süden, und dem Hindernis im Osten, wird die Punktwolke in Richtung Südsüdwest verschoben. Insgesamt ist der Baum deshalb in Richtung Südwesten geneigt. In den unteren Abbildungen 4.9(c) und 4.9(d) ist die Neigung in Richtung Südwesten ausgeprägter, da für die Generierung der Faktor $o = d/3.3$ verwendet wurde.

5 Evaluierung

In Kapitel 3 wurde vorgestellt wie Vegetationsszenarien bestehen aus Bäumen oder Sträuchern generiert werden können. Diese Generierung wurde in Kapitel 4 um Umweltfaktoren erweitert, mit dem Ziel Auswirkungen dieser Faktoren, die bei realen Pflanzen bemerkbar sind, auch im Modell sichtbar zu machen. In diesem Kapitel soll evaluiert werden, welche Auswirkungen beim Modell messbar sind und ob diese den in Kapitel 4 vorgestellten Effekten entsprechen und dadurch den Realismus steigern. Dafür werden in Abschnitt 5.1 beschrieben wie die Evaluierung durchgeführt werden soll und zwei Szenen vorgestellt, in denen Bäume generiert werden, an denen exemplarisch die Auswirkungen der Umwelteinflüsse gemessen werden. In den Unterabschnitten 5.2.1, 5.2.2 und 5.2.3 werden dann die Testkriterien *Neigung*, *Schwerpunkt* und *Optimierung* untersucht.

5.1 Evaluierungsszenarien

In diesem Kapitel wird überprüft, wie weit die Effekte der Anpassung an die Lichtverhältnisse *Neigung* und *Massenschwerpunkt* beim Modell bemerkbar sind und wie sich die Stärke der Auswirkungen über den Faktor o steuern lässt. Um dabei faktisch bewerten zu können, werden die Effekte an generierten Modellen gemessen. Hindernisse, die ebenfalls in die Generierung integriert wurden, werden durch die Berücksichtigung ihrer Schatten indirekt durch die Lichtverhältnisse beachtet und sind deswegen nicht separat Teil der Auswertung. Anhand der *Optimierung der Lichtgewinnung* beim Modell soll untersucht werden, ob der Realismus durch die auftretenden Effekte gesteigert wird. Um diese Möglichkeit der Aufnahme von Licht zu messen soll die Oberfläche der Baumkrone approximiert modelliert werden, und überprüft werden, wie viel Prozent dieser Fläche für eine gegebene beliebige Lichtquelle im Licht liegen. Die Oberfläche wird approximiert durch die Konvexe Hülle der Krone des Baumes.

Die konvexe Hülle ist ein Polygonnetz, bestehend aus einer Menge \mathcal{D} von Dreiecken, und umschließt eine gegebene Menge von Punkten minimal. Diese kann zum Beispiel

mit dem QuickHull Algorithmus berechnet werden [26]. Als Eingabe wird eine Menge an Punkten benötigt. In diesem Fall entspricht diese Menge allen Knoten aus \mathcal{V} , die zur Krone und damit nicht zum Stamm gehören. Zum Stamm gehören ausgehend vom Startknoten v_0 alle Knoten, deren Ausgangsgrad 1 ist. Sobald beim durchlaufen der Knoten über die Kindknoten ein Knoten erreicht wird, der einen Ausgangsgrad ungleich 1 hat, wurde eine Verzweigung erreicht und die Baumkrone beginnt. In Abbildung 5.1 ist die konvexe Hülle der Krone, berechnet durch den QuickHull Algorithmus, an einem Baummodell dargestellt.

Die Modelle, an denen gemessen wird, werden alle mit der gleichen Form der Punkt-wolke und gleichen Parametern, also mit dem gleichen Genotyp, generiert. Dadurch können die Auswirkungen der Umwelt auf den Phänotyp der Modelle verglichen werden. Ein Datensatz besteht aus den Messungen an elf solchen Modellen, bei denen die Punktfolge identisch ist und die jeweils einen anderen Wert für den Faktor o haben. Bei der Messung der Effekte werden zehn solcher Datensätze betrachtet, die sich nur durch zufällig erzeugte Punktfolgen der gleichen Form unterscheiden.

Die Modelle der Datensätze werden jeweils in zwei verschiedenen Szenen generiert, sodass bei der Auswertung zwischen diesen verglichen werden kann. Die Generierung und Messungen erfolgen in Java und die Modelle werden mit der *Java3D API* [23] modelliert und gerendert. Die Szenen sind wie in Kapitel 4 in Abschnitt 4.2 beschrieben aufgebaut. Die Positionen von Punkten können entweder durch kartesische- oder Kugelkoordinaten angegeben werden. Richtungen werden durch den Azimutwinkel der Kugelkoordinaten angegeben und den Achsen sind Himmelsrichtungen zugewiesen. Die positive x-Achse zeigt mit einem Azimutwinkel von 90

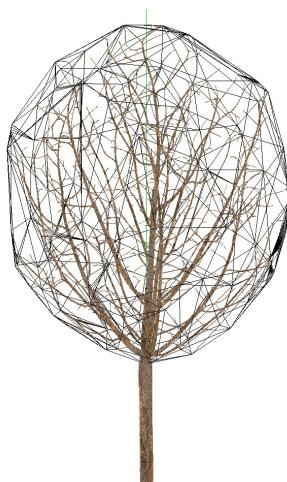


Abbildung 5.1: Die Konvexe Hülle der Baumkrone umschließt alle Knoten, die zur Krone gehören minimal und modelliert die Oberfläche der Baumkrone.

Grad nach Osten und die positive z-Achse verläuft mit einem Azimutwinkel von 180 Grad in südliche Richtung.

Die Szenen unterscheiden sich durch die gewählte Lichtquelle und dem Vorkommen von Hindernissen.

5.1.1 Szene A ohne Hindernisse

In Szene A wird eine statische Lichtquelle s_a und keine Hindernisse verwendet. Die statische Lichtquelle s_a hat einen Azimutwinkel von 180 Grad, was genau dem Süden entspricht, und einen Höhenwinkel von 61 Grad.

In Abbildung 5.2 ist Szene A aus östlicher Ansicht zu sehen. Die Baummodelle in Abbildung 5.2 wurden mit derselben Punktfolke aber verschiedenen Werten für den Faktor o in Szene A generiert. Der Baum in Abbildung 5.2(a) wurde mit dem Faktor $o = 0$ generiert, sodass die Lichtverhältnisse nicht berücksichtigt wurden. Der Baum in Abbildung 5.2(b) wurde mit $o = 0,006$ generiert. Es ist sinnvoll, o im Verhältnis zu der Länge d der Astsegmente zu betrachten, welche bei den gezeigten Beispielen $d = 0,02$ entspricht.

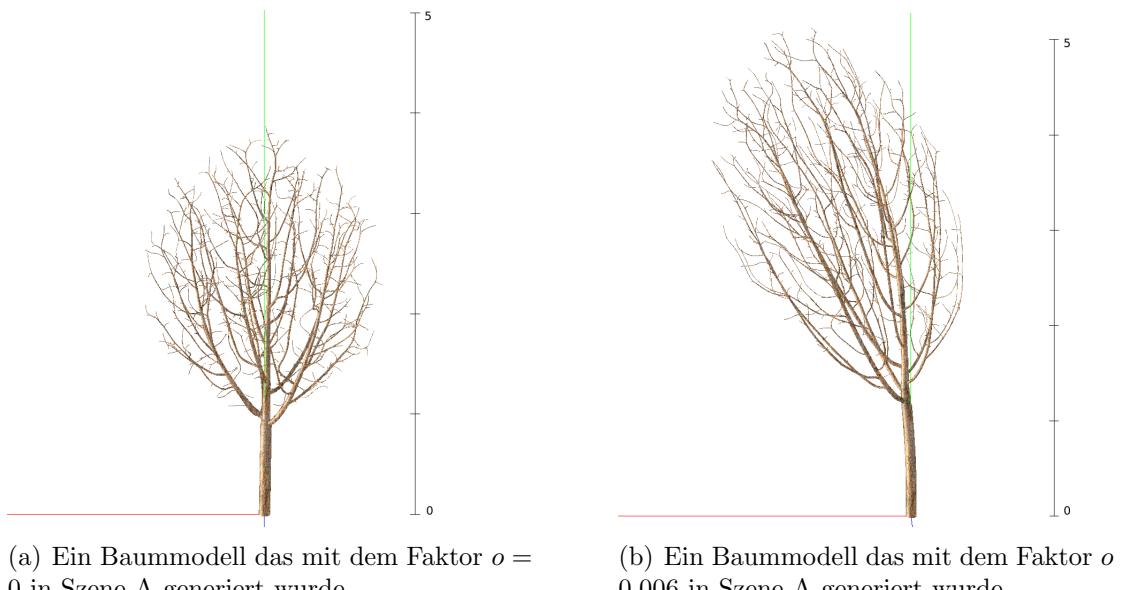


Abbildung 5.2: Visualisierung der Szene A, in der eine statische Lichtquelle und keine Hindernisse für die Generierung verwendet werden. Die z-Achse zeigt in Richtung Süden und ist in rot dargestellt. Die Szene ist aus östlicher Ansicht zu sehen. Die Größe des Baumes ist am Maßstab in Metern ablesbar. Für die Generierung der gezeigten Modelle wurde die gleiche Punktfolke verwendet. Die gezeigten Modelle wurden mit einer Baumrinden-Textur erzeugt [34].

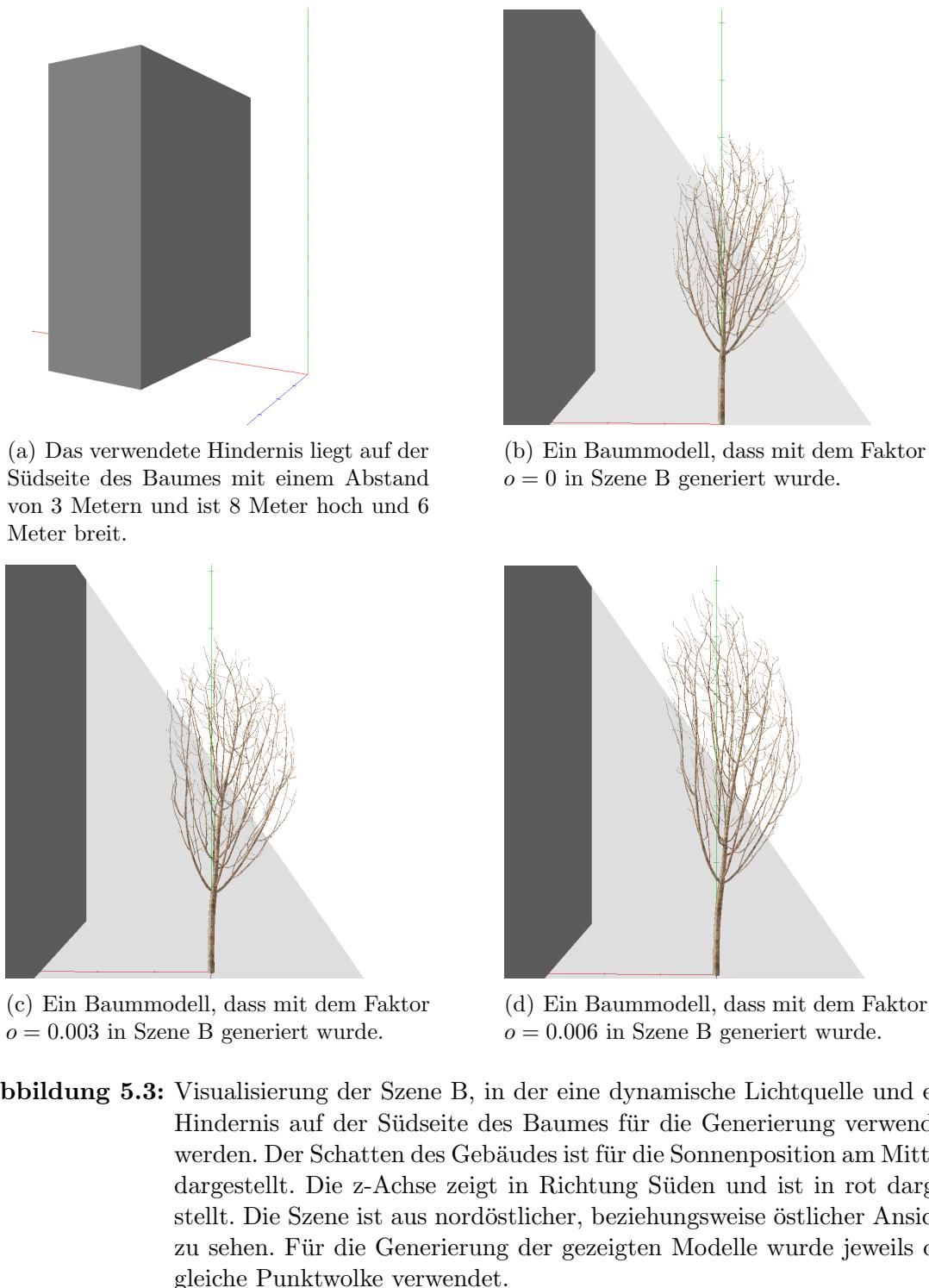
5.1.2 Szene B mit einem Hindernis

Szene B basiert, so wie Szene A, auf der in Abschnitt 4.2 vorgestellten Szenerie. Im Gegensatz zu A wird in Szene B eine dynamische Lichtquelle verwendet und es gibt ein Hindernis. Das Hindernis B_l ist in Abbildung 5.3(a) dargestellt. Es wird wie in Abschnitt 4.3 beschrieben durch die Punkte $\mathbf{c}_{l,1} = (-3, 0, 3)^T$ und $\mathbf{c}_{l,2} = (3, 8, 6)^T$ definiert und liegt damit 3 Meter südlich vom Ursprung entfernt und ist 8 Meter hoch und 6 Meter breit. Die dynamische Lichtquelle modelliert den Verlauf der Sonne am 126. Tag des Jahres und besteht aus der Menge \mathcal{S}_{126} von Sonnenpositionen die wie in Unterabschnitt 4.4.3 beschrieben mit stündlichem Abstand von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang berechnet werden. Der 126. Tag des Jahres entspricht genau dem Tag zwischen Frühlingsanfang und Sommersonnenwende. Die Modelle in den Abbildungen 5.3(b) bis 5.3(d) wurden mit der gleichen Punktfolge und den Faktoren $o = 0.005$, $o = 0.007$ und $o = 0.009$ generiert. Die Länge der Astsegmente entspricht wie in Szene A $d = 0.02$. Im Schatten ist der Baum in entgegengesetzte Richtung zum Hindernis und damit nach Norden geneigt. Bei dem Baum in Abbildung 5.3(d) ist deutlich zu erkennen, dass der Baum oberhalb der Schattenkante die Neigungsrichtung ändert und die Äste der oberen Partie der Baumkrone Richtung Süden zeigen.

5.2 Auswertung

In Kapitel 4 wurden sichtbare Auswirkungen genannt, die aus den Reaktionen von Pflanzen auf die Lichtverhältnisse in ihrer Umgebung resultieren. Dazu gehören die Neigung der Pflanze zum Licht hin, beziehungsweise in entgegengesetzte Richtung von Schattenquellen und die Verschiebung des Massenschwerpunktes in Richtung der Lichtquellen. Die Anpassung an die Lichtverhältnisse erfolgt, indem die Punktfolge \mathcal{P} bei jedem Schritt der Generierung entsprechend der Lichtverhältnisse verschoben wird. Der Baum wächst in die Punktfolge hinein und daher in die Richtung, in die die Punktfolge verschoben wird. Der Faktor o bestimmt darüber, wie weit \mathcal{P} verschoben wird. In diesem Abschnitt soll faktisch untersucht werden, ob und wie stark die Auswirkungen *Neigung* und *Verschiebung des Schwerpunktes* bei generierten Modellen messbar sind und wie wirksam der Faktor o bei der Regelung der Stärke dieser Effekte ist.

Des Weiteren wird untersucht ob die Menge an Licht die vom Baum aufgenommen werden kann durch die Anpassungen aus Kapitel 4 optimiert werden, um den Realismus des Modells zu bewerten.



Dafür werden zehn Datensätze untersucht, bei denen jeweils elf Bäume mit der gleichen Punktwolke aber unterschiedlichen Werten für den Faktor o generiert wurden. Dabei gilt $o \in \{0, 0.001, 0.002, \dots, 0.01\}$. Für jeden Datensatz wurde eine unterschiedliche Punktwolke benutzt, bei der zufällig Punkte innerhalb des gleichen Raumes erzeugt wurden.

5.2.1 Neigung

Wie in Abschnitt 4.4 erklärt, neigt sich eine Pflanze beim Wachsen durch eine Folge von chemischen Reaktionen dem Sonnenlicht zu. Dieser Effekt wird umso stärker, desto größer der Kontrast zwischen der helleren und der dunkleren Seite ist, sodass er vor allem da auftritt, wo die Pflanze im Schatten liegt. Durch diesen Effekt ist unter anderem die Anpassung der Pflanze an die Lichtverhältnisse sichtbar. Um den Realismus des Modells zu erhöhen und es an die Umgebung angepasst wirken zu lassen wurde die Generierung so erweitert, dass der Effekt auch beim Modell hervorgerufen wird.

Die Neigung des generierten Baumes G wird durch den Mittelwert der Winkel aller Astsegmente betrachtet. Für die Berechnung von Azimutwinkel a_m und Höhenwinkel h_m eines Astsegments $e_m = (\mathbf{v}_m, \mathbf{v}'_m) \in \mathcal{E}$ wird zunächst der zugehörige Vektor $\mathbf{r}_m = |\mathbf{v}'_m - \mathbf{v}_m|$ berechnet. Für diesen können die Winkel durch

$$a_m = \begin{cases} \arccos\left(-z_m/\sqrt{z_m^2 + x_m^2}\right) & , \text{ für } x \geq 0 \\ 360 - \arccos\left(-z_m/\sqrt{z_m^2 + x_m^2}\right) & , \text{ für } x < 0 \end{cases} \quad (5.1a)$$

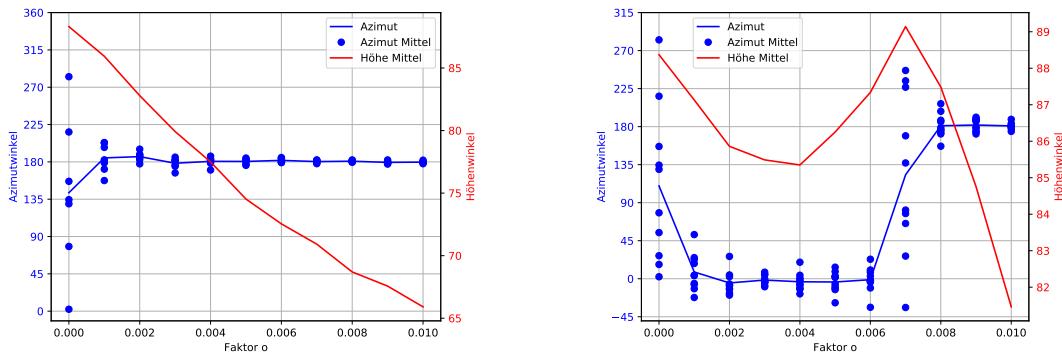
$$h_m = \arcsin(y_m / \langle \mathbf{r}_m \rangle) \quad (5.1b)$$

berechnet werden. Die Gleichung des Höhenwinkels lässt sich aus Gleichung 4.8 in Unterabschnitt 4.4.3 herleiten und die Berechnung des Azimutwinkels ergibt sich aus der Messung des horizontalen Winkels von Norden aus über Osten.

Der Mittelwert der Winkel aller Astsegmente $\mathbf{r}_{\mathcal{E}}$ wird dann berechnet über Mittelwert all ihrer Vektoren

$$\mathbf{r}_{\mathcal{E}} = \sum_{m=1}^{|\mathcal{E}|} \mathbf{r}_m. \quad (5.2)$$

Analog können für diesen Vektor wie in Gleichung 5.1 Azimutwinkel $a_{\mathcal{E}}$ und Höhenwinkel $h_{\mathcal{E}}$ berechnet werden.



(a) Das Ergebnis der Messungen der Neigungswinkel bei Generierung in Szene A.

(b) Das Ergebnis der Messungen der Neigungswinkel bei Generierung in Szene B.

Abbildung 5.4: Die Neigung des Baumes als Azimut- und Höhenwinkel in Abhängigkeit vom Faktor o . Die Werte des Azimutwinkel für einen getesteten Datensatz sind als blaue Punkte und der Mittelwert aller Datensätze als blaue Linie dargestellt. Der Höhenwinkel der Neigung ist als rote Linie dargestellt.

Ergebnisse der Messungen in Szene A ohne Hindernisse

In Abbildung 3.5.2 sind die Neigungswerte $a_{\mathcal{E}}$ und $h_{\mathcal{E}}$ in Abhängigkeit vom Faktor o für Szene A und B in Diagrammen angegeben. Für jeden Datensatz ist der Azimutwinkel als blauer Punkt dargestellt und der Mittelwert von allen Datensätzen als blaue Linie. Der Mittelwert der Höhenwinkel aller Datensätze wird als rote Linie dargestellt.

Die Werte für Szene A sind in Abbildung 5.4(a) abgebildet. Bei Faktor $o = 0$ werden die Lichtverhältnisse bei der Generierung nicht beachtet und die Punktwolke wird nicht verschoben. Daraus resultiert, dass die Werte von $a_{\mathcal{E}}$ stark gestreut sind, da die Richtung der Neigung nur von der zufällig erzeugten Punktwolke abhängig ist. Mit dem Steigen des Wertes von o nimmt die Streuung ab und $a_{\mathcal{E}}$ pendelt sich bei 180 Grad ein. Die statische Lichtquelle in Szene A hat einen Azimutwinkel von 180 Grad, also ist das generierte Modell genau zur Lichtquelle hin geneigt. Für die Richtung der Neigung zeigt die Erhöhung von o ab einem Schwellenwert von 0.005 keinen ausschlaggebenden Einfluss mehr. Für die Richtung der Neigung ist es in Szene A relevant, ob die Lichtverhältnisse beachtet werden oder nicht, aber die Höhe des regulierenden Faktors o spielt keine große Rolle.

Anders ist das für den Höhenwinkel $h_{\mathcal{E}}$, der in dem betrachteten Wertebereich mit dem Steigen des Faktors annähernd linear fällt. Umso niedriger $h_{\mathcal{E}}$ ist, desto stärker ist die Neigung des Baummodells. Mit dem Faktor lässt sich für Szene A die Stärke der Neigung kontrollieren.

Ergebnisse der Messungen in Szene B mit einem Hindernis

Die Werte für Szene B sind in Abbildung 5.4(b) dargestellt. Um die Werte von $a_{\mathcal{E}}$ besser darstellen zu können wurden gemessene Werte, die größer als 315 Grad sind, um 360 Grad reduziert, was der gleichen Richtung entspricht. Bei Faktor $o = 0$ ist der Wert von $a_{\mathcal{E}}$ analog zu Szene A stark gestreut. In Szene B wurde eine dynamische Lichtquelle benutzt und ein Gebäude steht als Hindernis im Süden. Ohne ein Hindernis würde die Punktfolge bei dieser Lichtquelle in Richtung Süden (180 Grad) verschoben werden. Das ergibt sich aus der Gleichung 4.22 in Unterabschnitt 4.4.6, durch die für einen Knoten \mathbf{v}_i der Vektor $\mathbf{b}_{i,j}$ berechnet wird, der in die Richtung zeigt aus der im Laufe des Tages j das meiste Licht einfällt. Dabei werden die Richtungen aller Sonnenpositionen $\mathbf{s}_t \in \mathcal{S}_j$ des Tages j , gewichtet mit ihren Höhenwinkel, aufsummiert. Die Richtungsvektoren nach Osten und Westen heben sich dabei gegenseitig auf, sodass $\mathbf{b}_{i,j}$ insgesamt Richtung Süden zeigt. Ohne Hindernisse ist der Vektor $\mathbf{b}_{i,j}$ an allen Knoten an denen er berechnet wird identisch, sodass die Punktfolge stetig Richtung Süden verschoben wird.

Durch das Hindernis im Süden ergibt sich für Knoten die im Schatten liegen ein Vektor $\mathbf{b}_{i,j}$, der Richtung Nordosten, Norden oder Nordwesten vom Hindernis weg zeigt, abhängig von den Sonnenpositionen aus \mathcal{S}_{126} . Zu Beginn einer Generierung gilt das für alle Knoten, da der Baum durch die noch kleine Größe vollständig im Schatten liegt. Mit dem Verlauf der Generierung wächst der Baum und wenn er über die Schattenkante hinausragt gibt es Knoten, bei denen $\mathbf{b}_{i,j}$ in Richtung Norden zeigt und welche, bei denen $\mathbf{b}_{i,j}$ in Richtung Süden zeigt. Ist das Verhältnis zwischen diesen Knoten ausgeglichen, wird die Punktfolge vor allem nach oben verschoben und die Richtung ergibt sich aus der zufällig erzeugten Punktfolge. Falls der Baum so groß wird, dass über die Hälfte der Knoten an denen $\mathbf{b}_{i,j}$ berechnet wird über der Schattenkante liegen, dann wird die Punktfolge ab dann in entgegengesetzte Richtung nach Süden verschoben.

Mit dem Steigen des Faktors o wird das generierte Modell größer, was beim Vergleich von Abbildung 5.3(b), dessen Modell mit $o = 0.005$ generiert wurde, mit Abbildung 5.3(d), dessen Modell mit $o = 0.009$ generiert wurde, deutlich wird. An dem Diagramm in Abbildung 5.4(b) ist bemerkbar, dass bei einem Faktor unter 0.007 die Richtung der Neigung gegen 0 Grad geht, also Richtung Norden. Daraus lässt sich schließen, dass die Modelle mehr Äste haben die in Richtung Norden zeigen als welche die in Richtung Süden zeigen, sodass der Baum insgesamt Richtung Norden geneigt ist. Der Baum befindet sich im Schatten und wächst in Richtung Norden, was dem kürzesten Weg zum Licht hin entspricht. Am Höhenwinkel lässt sich able-

sen, dass die Stärke der Neigung bis zum Faktor $o = 0.004$ zunimmt und daraufhin bis $o = 0.007$ wieder abnimmt. Bis zu $o = 0.004$ steigt also das Verhältnis von Ästen die nach Norden zeigen zu Ästen die nach Süden zeigen. Da die Größe des Modells mit steigendem Faktor zunimmt, steigt auch der Anteil des Baumes, der oberhalb der Schattenkante in der Sonne liegt. Ab $o = 0.004$ ist dieser Anteil groß genug, dass das Verhältnis von Ästen die nach Norden zeigen zu Ästen die nach Süden zeigen wieder abnimmt und die Stärke der Neigung im Mittelwert abnimmt. In Abbildung 5.3(b) ist ein Modell dargestellt, das in Szene B mit dem faktor $o = 0.005$ generiert wurde. Oberhalb der Schattenkante sind die Astspitzen in Richtung des Hindernisses nach Süden geneigt. Der Neigung des Baumes ist an die lokalen Lichtbedingungen angepasst. Wenn der Baum aus dem Schatten heraus gewachsen ist ändert sich das Wachstumsverhalten entsprechen der lokalen Lichtverhältnisse.

Bei $o = 0.007$ besteht ein ungefähres Gleichgewicht zwischen Ästen, die in Richtung Norden zeigen und solchen die, in Richtung Süden zeigen, weshalb die Richtung der Neigung wie bei Faktor $o = 0$ lediglich von der zufällig erzeugten Punktfolge abhängig ist, wodurch eine starke Streuung auftritt. Das Modell in Abbildung 5.3(c) wurde mit $o = 0.007$ in Szene B generiert.

Bei Werten für o größer als 0.007 schwingt die Richtung der Neigung um von 0 Grad in Richtung Norden zu circa 180 Grad nach Süden. Ab diesem Wert hat das Modell mehr Astsegmente die in Richtung Süden wachsen, als welche die nach Norden vom Hindernis weg wachsen. In Abbildung 5.3(d) ist das Ergebnis der Generierung mit $o = 0.009$ abgebildet. Oberhalb der Schattenkante sind die Äste in Richtung Süden geneigt. Die obere Hälfte des Baumes hat eine größere Auswirkungen auf den Mittelwert der Neigung, da in der Baumkrone und an der Spitze der Baumkrone mehr Äste sind als in der unteren Hälfte, die auch den Stamm beinhaltet. Der Höhenwinkel sinkt ab $o = 0.007$ da die Neigung in Richtung Süden stärker wird. Der Winkel sinkt dabei stärker als im Bereich von $o = 0$ bis $o = 0.004$. Zwischen Faktor $o = 0$ und $o = 0.007$ wächst der Baum primär vom Schatten weg und $\mathbf{b}_{i,j}$ ergibt sich durch den Verlauf der Sonne durch Vektoren die in Richtung Südosten, Norden und Südwesten zeigen. Die östlichen und westlichen Anteile der Vektoren heben sich dabei gegenseitig auf und die südlichen und nördlichen Richtungen wirken auch entgegengesetzt aber in diesem Bereich bis $o = 0.007$ überwiegt der Norden. Zwischen $o = 0.007$ und 0.01 ergibt sich zum größten Teil aus den Richtungen Südosten, Süden und Südwesten. Dabei eliminieren sich Osten und Westen wie im Bereich unter 0.007, aber für den Süden fällt der gegenläufige Vektor Richtung Norden weg, wodurch die Neigung in diesem Bereich stärker zunimmt und der Höhenwinkel schneller sinkt.

Beim Modell ist durch die Verschiebung der Punktwolke eine Neigung in Richtung der gewählten Lichtquelle beziehungsweise in entgegengesetzter Richtung von Hindernissen bemerkbar. Die Stärke der Neigung kann über den Faktor o gesteuert werden, sodass das Ausmaß dieser Auswirkung der Lichtverhältnisse an ein reales Vorbild angepasst werden kann.

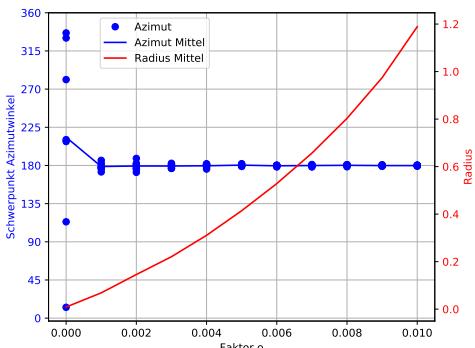
5.2.2 Massenschwerpunkt

In Abschnitt 4.4 wurde als weiterer Effekt der Reaktionen von Pflanzen auf die Lichtverhältnisse genannt, dass im Schatten stärkeres Längenwachstum stattfindet und weniger Verzweigungen entstehen, was dazu führt dass die Pflanze schneller zum Licht gelangt. Dadurch ist auf der Schattenseite weniger Masse vorhanden als auf der Sonnenseite, sodass der Massenschwerpunkt auf der Sonnenseite liegt.

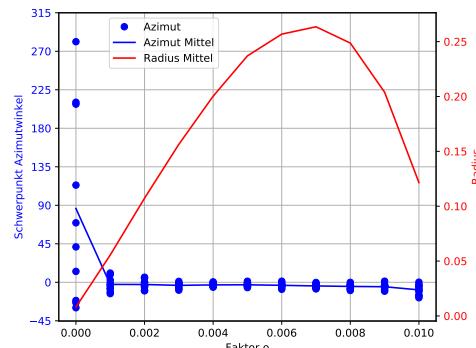
Beim Modell wird der Massenschwerpunkt als geometrischer Schwerpunkt untersucht, welcher als Mittelwert aller Knoten \mathcal{V} des Baumes berechnet wird:

$$\mathbf{c}_{\mathcal{V}} = \frac{1}{|\mathcal{V}|} \sum_{v \in \mathcal{V}} \mathbf{v}. \quad (5.3)$$

Dabei ist die horizontale Richtung vom Ursprung des Baumes aus zu $\mathbf{c}_{\mathcal{V}}$ interessant, um zu überprüfen ob sich der Schwerpunkt mit wachsendem Faktor in Richtung der Lichtquelle hin verschiebt. Die Entfernung des Schwerpunktes von der y-Achse gibt die Stärke der Verschiebung an. Die horizontale Richtung des Schwerpunkts



(a) Das Ergebnis der Messungen des Schwerpunktes bei Generierung in Szene A.



(b) Das Ergebnis der Messungen des Schwerpunktes bei Generierung in Szene B.

Abbildung 5.5: Der Schwerpunkt des Baumes als Azimuthwinkel und Radius in Abhängigkeit vom Faktor o . Die Werte des Azimuthwinkel für einen getesteten Datensatz sind als blaue Punkte und der Mittelwert aller Datensätze als blaue Linie dargestellt. Der Radius des Schwerpunktes ist als rote Linie dargestellt.

entspricht seinem Azimutwinkel a_V , der wie in Gleichung 5.1 berechnet wird. Die Entfernung von der y-Achse, die durch den Ursprung des Baumes verläuft, entspricht dem Radius $r_V = |(x_V, z_V)^T|$.

Richtung und Radius des Schwerpunktes sind in Abbildung 5.5 durch Diagramme in Abhängigkeit vom Faktor o angegeben.

Der Azimutwinkel verhält sich für $o = 0$ analog zur Neigung. Die Richtung des Schwerpunktes ist für $o = 0$ zufällig, abhängig von der zufällig generierten Punktewolke.

Ergebnisse der Messungen in Szene A ohne Hindernisse

In Szene A ist der Radius bei Faktor 0 am kleinsten, sodass der Schwerpunkt mit einem Abstand von unter 10cm in beliebiger Richtung vom Ursprung aus liegt. Sobald der Faktor größer als 0 ist, nähert sich der Azimut des Schwerpunktes genau wie der Azimut der Neigung an 180 Grad an, was der Richtung der statischen Lichtquelle entspricht. Mit dem Wachsen des Faktors wird die Neigung stärker und der Baum wird größer. Dadurch verschiebt sich der Schwerpunkt mit steigendem Faktor weiter zur Lichtquelle hin, was in einem steigenden Radius resultiert.

Bei einer Szene ohne Hindernisse ist die Lage des Schwerpunktes wenig aufschlussreich, da die Richtung des Schwerpunktes der Richtung der Neigung entspricht und der Radius mit der Stärke der Neigung steigt. Der Schwerpunkt liegt auf der Seite der Lichtquelle und lässt sich über den Faktor o steuern.

Ergebnisse der Messungen in Szene B mit einem Hindernis

Um die Werte der Richtung des Schwerpunktes besser darstellen zu können wurden gemessene Werte, die größer als 315 Grad sind, um 360 Grad reduziert, was der gleichen Himmelsrichtung entspricht. In Szene B liegt der Schwerpunkt des Modells auf der nördlichen Seite wenn o größer als 0 ist und die Punktwolke deshalb verschoben wird. Bis zum Faktor $o = 0.007$ ist der Baum in Richtung Norden geneigt und folglich ist auch der Schwerpunkt in diese Richtung verschoben. Bei einem Faktor o größer als 0.007 schwenkt die Neigung des Baumes in die entgegengesetzte Richtung gegen Süden um, der Schwerpunkt bleibt jedoch auf der Nordseite. In Abbildung 5.3(d) ist ein Modell dargestellt, das mit $o = 0.009$ generiert wurde, dargestellt und es ist zu sehen, dass auf der nördlichen Seite (im Bild rechts) von der grün dargestellten y-Achse aus mehr Masse vorhanden ist. Am Radius des Schwerpunktes ist dieses Umschwenken der Neigungsrichtung bei Faktor $o = 0.007$ erkennbar. Bis $o = 0.007$

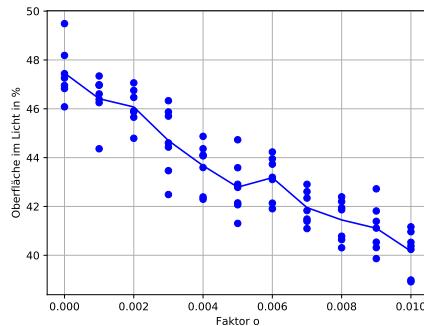
steigt der Radius und der Schwerpunkt entfernt sich weiter vom Ursprung des Baumes. Wenn die Richtung der Neigung in die entgegengesetzte Richtung wechselt, dann wandert auch der Schwerpunkt in diese Richtung sodass er sich wieder mehr an den Ursprung annähert und der Radius abnimmt. Der Schwerpunkt verbleibt dabei jedoch zunächst auf der nördlichen Seite. Die Stärke der Neigung nimmt in diesem Bereich ab 0.007 stark zu, weshalb die Änderung des Radius ebenfalls stärker ist als im Bereich bis 0.007. Bis der Schwerpunkt auf die andere Seite wechselt, muss der Baum oberhalb der Schattenkante so weit Richtung Süden wachsen, dass mehr Masse auf der Südseite als auf der Nordseite vorhanden ist.

Wenn Hindernisse in der Szene vorkommen, ist der Schwerpunkt aussagekräftiger als ohne Hindernisse, da sich aus der Richtung und Stärke der Neigung nicht direkt ablesen lässt, wie der Schwerpunkt sich verhält. Bei realen Pflanzen befinden sich auf der dunkleren Seite weniger Äste und Verzweigungen, was bei den Modellen ebenfalls bemerkbar ist. Der Baum in Abbildung 5.3(d) hat unterhalb der Schattenkante weniger Äste auf der Schattenseite. Oberhalb der Schattenkante ist das Wachstum in südliche Richtung geneigt, sodass in diese Richtung mehr Äste entstehen und dadurch mehr Masse. Bei einem im Verhältnis zum Baum kleinen Hindernis entsteht bei der Generierung insgesamt nicht weniger Masse auf dieser Schattenseite, da es darauf ankommt wie die Lichtverhältnisse für den größten Teil des Baumes sind. Da der größte Teil dann im Licht liegt, wird der Baum zur Lichtquelle hin geneigt generiert und der Massenschwerpunkt liegt auf der Seite der Lichtquelle. Der Schwerpunkt ist an die dynamische Lichtquelle mit den Hindernissen angepasst und über den Faktor α steuerbar.

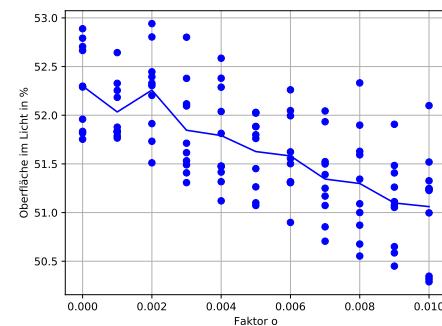
5.2.3 Optimierung der Lichtgewinnung

Durch die Reaktionen, die Pflanzen auf die Lichtverhältnisse ihrer Umgebung zeigen, werden ihre Möglichkeiten, Energie durch das Sonnenlicht aufzunehmen, optimiert. Ausgehend davon kann als ein Aspekt des Realismus beim Modell untersucht werden, ob ebenfalls die Menge an Licht, die aufgenommen werden kann, optimiert wird.

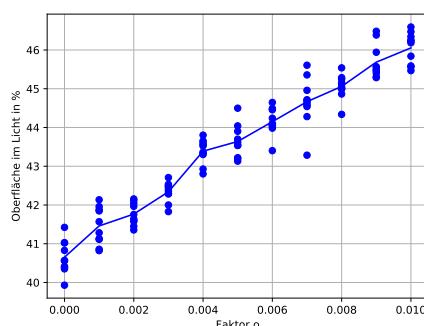
Um das zu überprüfen wird der Anteil der Oberfläche des Baumes gemessen, die vom Licht getroffen wird. Die Oberfläche wird dabei durch eine konvexe Hülle wie zu sehen in Abbildung 5.1 in Abschnitt 5.1 modelliert. Die konvexe Hülle wird für die Baumkrone ohne den Stamm berechnet und ist eine Menge \mathcal{K} von Dreiecken $\mathcal{D}_m = (\mathbf{d}_{m,1}, \mathbf{d}_{m,2}, \mathbf{d}_{m,3})$, die die Baumkrone minimal umschließen. Der Stamm wird für die Berechnung der Oberfläche ausgelassen, da er keine Blätter hat und somit nicht für die Aufnahme von Licht relevant ist.



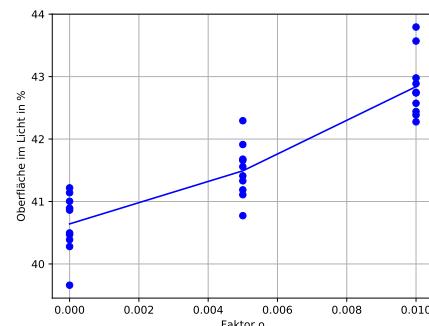
(a) Das Ergebnis der Messungen des Lichtanteils bei Generierung in Szene A mit der statischen Lichtquelle, die auch für die Generierung verwendet wurde.



(b) Das Ergebnis der Messungen des Lichtanteils bei Generierung in Szene A mit einer dynamischen Lichtquelle.

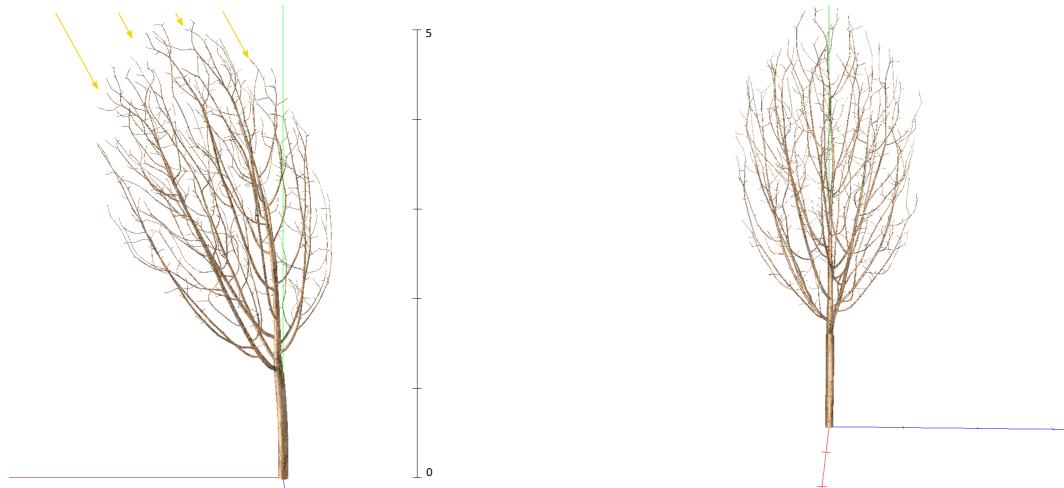


(c) Das Ergebnis der Messungen des Lichtanteils bei Generierung in Szene B mit der dynamischen Lichtquelle, die auch für die Generierung verwendet wurde.



(d) Das Ergebnis von Messungen in Szene B mit der dynamischen Lichtquelle mit anderen Datensätzen, bei denen die erzeugten Modelle bei jedem untersuchten Faktor ungefähr gleich groß sind.

Abbildung 5.6: Der Anteil der Oberfläche des Baumes im Licht angegeben in Prozent in Abhängigkeit vom Faktor o . Die konkreten Werte für einen getesteten Datensatz sind als blaue Punkte und der Mittelwert aller Datensätze als blaue Linie dargestellt.



(a) Das Baummodell aus Abbildung 5.2(b), bei dem Pfeile hinzugefügt wurden, die den Höhenwinkel der Lichtstrahlen zeigen.

(b) Das Baummodell aus Abbildung (a) aus der südlichen Ansicht.

Abbildung 5.7: Ergänzung der zu Szene A gezeigten Abbildungen. Durch das Wachstum in Richtung der Lichtquelle wird ein kleinerer Teil der Oberfläche vom Licht getroffen.

Um für eine statische Lichtquelle \mathbf{s}_t zu messen, wie groß der Anteil der Oberfläche \mathcal{K} im Licht ist, wird für alle Dreiecke \mathcal{D}_m eine Menge von Testpunkten \mathcal{T}_m ausgewählt, wobei die Anzahl abhängig vom Flächeninhalt der Dreiecke ist, damit die unterschiedlichen Größen keine Auswirkungen auf das Ergebnis haben. Für alle Punkte \mathbf{t}_n aus der Vereinigung aller Testmengen $\bigcup \mathcal{T}_m$ wird überprüft, ob sie im Schatten eines Gebäudes liegen, wie beschrieben in Unterabschnitt 4.4.4 mit der Gerade $g_{t,n}$ der Lichtquelle \mathbf{s}_t und dem Punkt \mathbf{t}_n (siehe Gleichung 4.10). Falls sie nicht im Schatten eines Hindernisses liegen wird getestet, ob sie im Eigenschatten des Baumes liegen. Dafür wird analog zu dem Schnitttest mit den Gebäuden für alle Dreiecke \mathcal{D}_m mit der Gerade $g_{t,n}$ getestet, ob es einen Schnittpunkt gibt. Falls es einen Schnittpunkt mit einem Hindernis oder einem der Dreiecke gibt, dann liegt der Punkt \mathbf{t}_n im Schatten und ansonsten im Licht. Sei \mathcal{T}_t die Menge der Punkte \mathbf{t}_n , die für die Lichtquelle \mathbf{s}_t im Licht liegen, dann ergibt sich der Anteil der Oberfläche im Licht approximiert durch

$$l_t = |\mathcal{T}_t| / |\bigcup \mathcal{T}_m|. \quad (5.4)$$

Für eine dynamische Lichtquelle \mathcal{S}_j , die aus einer Menge von statischen Lichtquelle

\mathbf{s}_t besteht, wird der Anteil der Oberfläche im Licht als

$$l_j = \frac{1}{|\mathcal{S}_j|} \sum_{t=1}^{|\mathcal{S}_j|} l_t \quad (5.5)$$

berechnet, indem die Lichtanteile der statischen Lichtquellen addiert und das Ergebnis durch ihre Anzahl geteilt wird. So erhält man den Mittelwert des Lichtanteils der Oberfläche für eine dynamische Lichtquelle \mathcal{S}_j .

Ergebnisse der Messungen in Szene A ohne Hindernisse

In Szene A wurde die statische Lichtquelle \mathbf{s}_a bei der Generierung verwendet. Für die Auswertung des Lichtanteils der Oberfläche wird l_a für jeden Datensatz pro Wert für o berechnet. In Abbildung 5.6(a) ist l_a in Abhängigkeit vom Faktor o angegeben. Das Wachstum ist genau an die statische Lichtquelle angepasst mit der auch die Berechnung durchgeführt wurde, aber der Anteil der Fläche der im Licht liegt steigt nicht wie gewollt an sondern sinkt um durchschnittlich circa 7%. Eine Erklärung dafür ist, dass wenn der Baum zur Lichtquelle geneigt in Richtung Süden wächst, die Flächen die nach Osten und Westen zeigen dadurch größer werden, während die frontale Fläche Richtung Süden ungefähr ihre Größe beibehält.

In Abbildung 5.7(a) ist der Baum aus Abbildung 5.2(b) abgebildet und es wurden gelbe Pfeile hinzugefügt, die den Höhenwinkel der Sonnenposition \mathbf{s}_a zeigen. Der Baum ist so geneigt, dass die Oberseite der Oberfläche in Richtung der Lichtquelle zeigt und dadurch das Licht für den Rest der Oberfläche verdeckt. In Abbildung 5.7(b) ist dieser Baum aus der südlichen Ansicht zu sehen. Die dem Süden zugewandte Fläche ist bei dem Modell kleiner als die östliche und westliche Seite.

Die dynamische Lichtquelle \mathcal{S}_{126} , die in Szene B benutzt wurde, beleuchtet den Baum auch von Osten und Westen und steht im Süden mit einem Höhenwinkel von circa 55 Grad, sodass auch mehr von der frontalen Fläche des Baumes aus Szene A beleuchtet wird. In Abbildung 5.6(b) ist die Auswertung l_{126} der Lichtfläche für Szene A in Abhängigkeit vom Faktor o dargestellt. Für diese dynamische Quelle sinkt der Anteil im Licht mit erhöhen des Faktors zwar weniger, um circa 1.25%, jedoch ist ein Anstieg vorgesehen.

Ohne ein Hindernis in der Testszene hat der Lichtanteil bei der Messung mit einer statischen und einer dynamischen Lichtquelle abgenommen, was dem Gegenteil des gewünschten Effektes entspricht. Das Modell ist an die Umgebung angepasst aber erfüllt nicht das verwendete Kriterium für Realismus.

Ergebnisse der Messungen in Szene B mit einem Hindernis

In Abbildung 5.6(c) ist die Auswertung l_{126} des Lichtanteils der Oberfläche für Szene B mit der dynamischen Lichtquelle S_{126} abgebildet. In dieser Szene, in der ein Hindernis verwendet wurde, steigt der Anteil der Oberfläche im Licht mit dem erhöhen des Faktors. Von Faktor $o = 0$ bis $o = 0.001$ steigt l_{126} stetig um circa 5% an. Durch die Anpassung wächst der Baum zunächst in Richtung Norden, sodass er schneller oberhalb der Schattenkante ist und im Schatten weniger Masse ausbildet, wodurch der Anteil der Fläche im Licht erhöht wird. Mit steigendem Faktor wird das generierte Modell größer. Wenn das Modell so groß ist, dass der größere Teil des Baumes oberhalb der Schattenkante liegt würden die gleichen Probleme auftreten wie bei der Generierung ohne Hindernisse in Szene A. In der Messung in Szene B bis Faktor $0 = 0.001$ ist das nicht der Fall. Dadurch dass der Baum mit steigendem Faktor größer wird, ragt ein größerer Teil der Krone über den Schatten des Hindernisses herüber, wodurch zwangsläufig ein größerer Teil des Baumes im Licht ist. Deswegen kann für diese Daten nicht klar gesagt werden weshalb l_{126} mit dem Erhöhen des Faktors ansteigt.

Um einschätzen zu können, ob auch günstigeres Wachstum oder nur die größere Höhe des Baumes eine Rolle spielt, werden Generierungen in Szene B durchgeführt, bei denen die Punktwolke so angepasst wird, dass die Endergebnisse unabhängig vom Faktor o ungefähr die gleiche Größe haben. Es werden die Faktoren $o = 0$, $o = 0.005$ und $o = 0.01$ getestet, mit Punktwolken deren Größen so gewählt sind, dass die Größe des resultierenden Baummodells für jeden Faktor ungefähr 3.7 Meter beträgt. Aus diesem Grund werden nicht Datensätze mit jeweils festgelegter Punktwolke benutzt, sondern bei jeder Generierung die Punktwolke zufällig, aber pro Faktor mit den selben Parametern, generiert. Für jeden Faktor wurden elf Modelle untersucht. Das Ergebnis dessen ist in Abbildung 5.6(d) zu sehen.

Mit dem Steigen des Faktors steigt l_{126} um fast 1.5% an, woraus sich schließen lässt, dass die Verbesserung des Lichtanteils der Oberfläche nicht nur daraus resultiert, dass das Modell mit einem höheren Faktor größer wird.

Bei Modellen, die in einer Szene mit Hindernis generiert wurden ist das Kriterium für Realismus erfüllt und sie sind an die Umgebung angepasst.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

Zu Beginn der Arbeit wurden verschiedene Techniken vorgestellt, mit denen realistische Vegetationsszenarien erzeugt werden können, darunter auch die Generierung mithilfe des Space Colonization Algorithmus. Diese wurde in Kapitel 3 genauer vorgestellt. Dabei wurden Modelle von Bäumen und Büschen erzeugt, die realistisch wirken aber nicht an die Szenerie in der sie erzeugt wurden angepasst sind.

Um das Modell an die Umgebung angepasst zu generieren, wurde in Kapitel 4 zunächst ein Überblick über Umweltbedingungen gegeben, die Einfluss auf das Wachstum von Pflanzen nehmen. Von diesen wurden Hindernisse, die das Wachstum behindern und die Lichtverhältnisse genauer untersucht und so modelliert, dass ihr Einfluss in die Generierung integriert werden konnte. Der hauptsächliche Fokus lag dabei auf den Lichtverhältnissen, welche Einfluss die Neigung und die Lage des Schwerpunktes von Bäumen haben, da das Wachstum in die Richtung der Seite mit mehr Licht gelenkt wird. Diese entspricht der Seite in Richtung der Lichtquelle, falls die untersuchte Stelle im Licht liegt und der entgegengesetzten Richtung zu einem Hindernis, falls dieses Schatten auf die untersuchte Stelle wirft. Die Stärke dieser Auswirkungen wurde über einen Faktor gesteuert.

Für die Evaluierung wurden in Kapitel 5 zwei Testszenarien vorgestellt, von denen eines ein Hindernis enthält, das einen Schatten auf den generierten Baum wirft, und das andere kein Hindernis enthält. Für die zu untersuchenden Kriterien *Neigung*, *Schwerpunkt* und *Anteil der Oberfläche im Licht* wurden Maße eingeführt, anhand derer anschließend eine faktische Auswertung erfolgte. Durch Generierung von Modellen in den Testszenarien und Messungen der Testkriterien wurde evaluiert, ob die Einflüsse angemessen modelliert wurden, und dadurch die beschriebenen Effekte auch beim Modell auftreten. Dabei war sowohl die Neigung als auch der Schwerpunkt in beiden getesteten Szenarien entsprechend der Erwartungen an die Lichtverhältnisse angepasst. Des Weiteren wurde die Kontrollierbarkeit der Stärke dieser Einflüsse durch den eingeführten Faktor untersucht. Bei der Evaluierung war

eine Abhängigkeit der Stärke von Neigung und Verschiebung des Schwerpunktes von der Höhe dieses Faktors festzustellen. Jedoch stieg mit dem erhöhen des Faktors auch die Größe des Baumes, wodurch die Kontrollierbarkeit der Größe verloren ging. Zuletzt wurde der Realismus bewertet, indem überprüft wurde ob die Verbesserung der Möglichkeiten zur Aufnahme von Licht, die bei realen Pflanzen durch die modellierten Effekte auftritt, auch beim Modell bemerkbar ist. Dabei stellte sich heraus, dass in der Testszene A ohne Hindernisse der Anteil der Oberfläche, der im Licht liegt, mit dem Steigen des Faktors abnahm. Der gesteigerte Realismus wurde also ausgehend von diesem Kriterium nicht erreicht, obwohl das Ergebnis an die Szene angepasst wirkte. In der Szene B mit einem Hindernis wurde der Anteil, wie gewünscht, gesteigert und das Modell wirkte ebenfalls wegen der sichtbaren Effekte an die Szene angepasst. Eine Möglichkeit für dieses Ergebnis ist, dass die untersuchten Effekte bei Pflanzen verstärkt auftreten an Stellen, die sich im Schatten befinden. Dadurch war die Steigerung der Fläche im Licht in einer Szene mit Schattenwurf durch ein Hindernis möglich, und ohne dieses Hindernis nicht.

Insgesamt war es möglich Modelle zu generieren, die eine realitätskonforme Erscheinung haben und an ihre Umgebung angepasst erscheinen, wodurch sie in einer Szene realistisch wirken. Die Generierung war im Hinblick auf Aussehen des Modells und Stärke der Anpassung an die Umgebung kontrollierbar und es konnten Modelle mit genug Variation erzeugt werden. Jedoch wurde das Kriterium mit dem der Realismus bewertet wurde nur bedingt erfüllt.

6.2 Ausblick

Angesichts der Probleme die bei der Generierung auftreten, lassen sich Anpassungen durchführen, die das Ergebnis verbessern können. Das Kriterium für Realismus wurde bei der Generierung nur erfüllt, wenn in der Szene Schatten durch Hindernisse vorhanden waren. Um das Realismus-Kriterium auch zu erfüllen, wenn keine Schatten vorhanden sind, könnten die Anpassungen differenzierter angewendet werden, indem zum Beispiel die Reaktionen auf die Lichtverhältnisse abgeschwächt werden, wenn sich das Modell im Licht befindet, sodass der Schatten relevanter wird. Eine weitere Möglichkeit ist es, die Reaktionen auf die Lichtverhältnisse, für den Fall dass sich das Modell nicht im Schatten befindet, abzuändern, sodass die Reaktionen von realen Pflanzen geeigneter modelliert werden. Die Stärke der Anpassung an die Umgebung ist bei der Generierung kontrollierbar, jedoch ist durch die Anpassung an die Lichtverhältnisse die Kontrollierbarkeit der Größe des Baumes verloren gegangen.

Eine zusätzliche Verbesserung wäre, wenn die Kontrollierbarkeit der Größe des Modells wieder erreicht werden könnte, indem zum Beispiel die Punktfolge angepasst an die Stärke der Anpassungen skaliert wird.

Die Generierung wurde so angepasst, dass die Wachstumsrichtung des gesamten Baumes geändert wird. Alternativ könnte das Wachstum auch an allen Stellen unabhängig voneinander an die individuellen Lichtverhältnisse angepasst werden. Um die Anpassung an die Lichtverhältnisse in der Umgebung weiter zu erhöhen könnten zusätzlich künstliche Lichtquellen in die Generierung integriert werden oder der Einfluss der Jahreszeiten auf den Verlauf der Sonne beachtet werden. Des Weiteren können zusätzliche Umweltfaktoren, wie beispielsweise der Wind, in die Generierung integriert werden um die Anpassung an die Umgebung weiter zu erhöhen.

Insgesamt ist die Generierung mit dem Space Colonization Algorithmus vielseitig erweiterbar, sodass Ergebnisse erzielt werden können, die noch stärker an ihre Szenerie angepasst und realistischer sind.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Bilder von dreidimensionalen Modellen eines Bauprojekts in einem urbanen Gebiet.	3
1.2	Bäume und Büsche in einer Graslandschaft im Spiel <i>The Witcher 3: Wild Hunt</i>	4
2.1	Ein Baum, der mit dem <i>Weber-Penn Tree</i> Plug-in für die <i>Helios API</i> erzeugt wurde.	8
2.2	Zwei Bäume die durch ihre Nähe um den verfügbaren Platz konkurrieren, generiert mit dem <i>Space Tree Pro</i> Plug-in für Blender	9
2.3	Grobe Darstellung des Ablaufs der modularen Generierung von Bäumen.	11
3.1	Darstellung eines Baummodells und des zugrundeliegenden Skeletts. .	14
3.2	Einfluss der Wahl von f auf die Form der Punktfolge.	19
3.3	Vergleich von zwei Bäumen bei Variation der Verteilung der Punkte in der Punktfolge.	21
3.4	Auswirkungen von Variationen von $ \mathcal{P} $ auf das Modell eines Baumes.	22
3.5	Die wesentlichen Schritte des Space Colonization Algorithmus.	24
3.6	Darstellung eines Skeletts, das als Rohmodell mit dem Space Colonization Algorithmus generiert wurde.	27
3.7	Beispielhafte Resultate der Dezimierung der Knoten eines Baumskeletts.	28
3.8	Beispielhafte Resultate der Reduzierung der Winkelgrößen an Verzweigungen nach der Dezimierung der Knoten.	30
3.9	Beispielhafte Resultate der Unterteilung der Äste nach der Dezimierung der Knoten und Reduzierung der Winkelgrößen.	32
3.10	Vergleich eines Skeletts vor und nach der Nachbearbeitung anhand des graphischen Modells.	33
3.11	Darstellung eines Kegelstumpfes T_i , der ein Astsegment e_i modelliert.	34
3.12	Das Modell eines Baumes bei dem Blätter hinzugefügt wurden.	36

3.13 Ein Busch und ein Baum als Ergebnisse der Generierung mit dem Space Colonization Algorithmus.	38
4.1 Das verwendete Koordinatensystem mit den Himmelsrichtungen.	41
4.2 Eine Szene mit einem Gebäude als Hindernis.	43
4.3 Das Ergebnis der Generierung eines Baumes unter der Berücksichtigung von Hindernissen.	44
4.4 Äquatoriales astronomisches Koordinatensystem.	49
4.5 Berechnung der Wachstumsrichtung im Schatten, 1. Variante.	54
4.6 Berechnung der Wachstumsrichtung im Schatten, 2. Variante.	55
4.7 Eine mit einer statischen Lichtquelle ohne Hindernisse.	57
4.8 Eine Szene mit einer statischen Lichtquelle und einem Hindernis . . .	58
4.9 Eine Szene mit einer dynamischen Lichtquelle und einem Hindernis .	61
5.1 Konvexe Hülle der Baumkrone.	64
5.2 Visualisierung der Szene A für die Evaluierung	65
5.3 Visualisierung der Szene B für die Evaluierung	67
5.4 Auswertung der Neigung von Baummodellen.	69
5.5 Auswertung des Schwerpunktes von Baummodellen.	72
5.6 Auswertung des Anteils der Oberfläche im Licht.	75
5.7 Ergänzungen zu Szene A	76

Algorithmenverzeichnis

3.1	Algorithmus zur Dezimierung der Knoten eines Astes	29
3.2	Algorithmus zur Unterteilung eines Astes	31

Literaturverzeichnis

- [1] AKBARI, H.; POMERANTZ, M.; TAHAN, H.: Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. In: *Solar Energy* 70 (2001), Nr. 3, S. 295–310
- [2] BENNIE, J.; DAVIES, T.W.; CRUSE, D.; GASTON, K.J.: Ecological effects of artificial light at night on wild plants. In: *Journal of Ecology* 104 (2016), Mai, S. 611–620
- [3] BLANKENSHIP, R.E.: *Molecular Mechanisms of Photosynthesis*. John Wiley & Sons, Ltd, 2002. – URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9780470758472.ch1>. – Zugriffsdatum: 16.01.20
- [4] BURDEN, R.L.; FAIRES, J.D.: *Numerical Analysis: 9th Ed.* Boston, MA, USA: Brooks/Cole, 2010
- [5] CODER, K.D.: Identified benefits of community trees & forests. (2011)
- [6] DOMSCHKE, W.; DREXL, A.: *Einführung in Operations Research*. 9. Auflage. Berlin: Springer Gabler, Berlin, Heidelberg, 2015
- [7] DUDEN: *Vegetation*. – URL <https://www.duden.de/rechtschreibung/Vegetation>. – Zugriffsdatum: 13.02.2020
- [8] EMBA: *Urban Planning Cunit (Spain)*. – URL <http://www.emba.cat/?p=684>. – Zugriffsdatum: 12.02.2020
- [9] GOLD, S.M.: Social benefits of trees in urban environments. In: *International Journal of Environmental Studies* 10 (1976), Nr. 1, S. 85–90
- [10] GRAF, A.; SCHLERETH, A.; STITT, M.; SMITH, A.M.: Circadian control of carbohydrate availability for growth in *Arabidopsis* plants at night. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107 (2010), Nr. 20, S. 9458–9463

- [11] HALE, A.; BUTCHER, A.; CANSECOGPC: *Sapling Tree Gen.* – URL https://docs.blender.org/manual/fr/dev/addons/add_curve/sapling.htm. – Zugriffsdatum: 10.02.2020
- [12] HANSLMEIER, A.: *Einführung in Astronomie und Astrophysik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014
- [13] HANSON, J.: Rotations in three, four, and five dimensions. In: *arXiv e-prints* (2011), März. – URL <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2011arXiv1103.5263H>. – Zugriffsdatum: 14.12.2019
- [14] HARTMANN, S.: *Technische Mechanik*. 1. Auflage. WILEY-VCH Verlag, 2015
- [15] HELIOS: *Weber-Penn Tree Plugin Documentation*. – URL https://baileylab.ucdavis.edu/software/helios/_weber_penn_doc.html. – Zugriffsdatum: 10.02.2020
- [16] HOFIERKA, J.; RI, M.: The solar radiation model for Open source GIS: Implementation and applications. In: *Proceedings of the Open Source GIS-GRASS Users Conference* (2002), Oktober
- [17] LARCHER, W.: *Ökophysiologie der Pflanzen*. 6. Auflage. Eugen Ulmer, 2001
- [18] LÜTTGE, U.; HERTEL, B.: Diurnal and annual rhythms in trees. In: *Trees - Structure and Function* 23 (2009), August, S. 683–700
- [19] MEIER, A.: *Methoden der grafischen und geometrischen Datenverarbeitung*. Vieweg+Teubner Verlag, 2013
- [20] MICHEL'S ADD-ONS & MORE: *Space Tree Pro*. – URL <https://blendermarket.com/products/space-tree-pro/docs>. – Zugriffsdatum: 10.02.2020
- [21] MUDAY, G.K.: Auxins and Tropisms. In: *Journal of Plant Growth Regulation* 20 (2001), September, Nr. 3, S. 226–243
- [22] NITSCHKE, M.: *Geometrie Anwendungsbezogene Grundlagen und Beispiele für Ingenieure*. 2., aktualisierte Auflage. Berlin [u.a.]: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2014
- [23] ORACLE: *Java 3D API*. – URL <https://www.oracle.com/technetwork/java/javase/tech/index-jsp-138252.html>. – Zugriffsdatum: 07.02.2020

- [24] PAPULA, L.: *Mathematische Formelsammlung: Für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017
- [25] PFLANZENFORSCHUNG: *Vererbung*. – URL <https://www.pflanzenforschung.de/de/themen/lexikon/vererbung-299>. – Zugriffsdatum: 11.02.2020
- [26] PREPARATA, F.P.; SHAMOS, M.I.: *Computational Geometry: An Introduction*. New York, NY: Springer New York, 1985
- [27] RUNIONS, A.: *Modeling Biological Patterns using the Space Colonization Algorithm*. Calgary, Alberta, University of Calgary, Diplomarbeit, 2008
- [28] SANTOS, B.: *5 Ways 3D City Models Plan a Better Tomorrow for Urban Communities*. – URL <https://www.microdesk.com/articles/5-ways-3d-city-models-plan-a-better-tomorrow-for-urban-communities/>. – Zugriffsdatum: 11.02.2020
- [29] SIRK, H.: *Einführung in die Vektorrechnung: Für Naturwissenschaftler, Chemiker und Ingenieure*. Heidelberg: Steinkopff, 1974
- [30] SPURA, C.: *Technische Mechanik 1. Stereostatik: Ein etwas anderes Lehrbuch*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016
- [31] STEAMCOMMUNITY: *The Witcher 3: Wild Hunt Screenshot*. – URL <http://steamcommunity.com/sharedfiles/filedetails/?id=599009772>. – Zugriffsdatum: 13.02.2020
- [32] STÖCKLIN, J.: *Die Pflanze: moderne Konzepte der Biologie*. Bundesamt für Bauten und Logistik, BBL, 2007 (Beiträge zur Ethik und Biotechnologie)
- [33] TOGELIUS, J.; CHAMPANDARD, A.J.; LANZI, P.L.; MATEAS, M.; PAIVA, A.; PREUSS, M.; STANLEY, K.O.: Procedural Content Generation: Goals, Challenges and Actionable Steps. In: *Artificial and Computational Intelligence in Games* Bd. 6. Dagstuhl, Germany: Schloss Dagstuhl–Leibniz-Zentrum fuer Informatik, 2013, S. 61–75
- [34] TONYTEXTURES: *Baumrinden Texturen*. – URL <https://www.tonytextures.de/kostenloser-download-15-kachelbarebaumrinden-texturen/>. – Zugriffsdatum: 07.11.2019
- [35] ULRICH.FUCHS: *Astronomie - Skizze Ekliptik/Frühlingspunkt/Deklination/Rektazension*. 2009. – URL <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:AstroDe>

- klinationRektazension-de.jpg. – Zugriffsdatum: 10.01.20. – Lizenz: Creative Commons <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/legalcode>
- [36] VALVE: *Die besten von 2019 Topseller*. – URL https://store.steampowered.com/sale/2019_top_sellers. – Zugriffsdatum: 13.02.2020
- [37] WDIESTEL: *Arbaro - 3D tree model generator*. – URL <https://github.com/wdiestel/arbaro>. – Zugriffsdatum: 10.02.2020
- [38] WEBER, J.; PENN, J.: Creation and Rendering of Realistic Trees. In: *Proceedings of the 22nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 1995
- [39] WETZEL, S.: *Astronomisches Koordinatensystem des Horizonts*. 2009. – URL <https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:HorSys.svg>. – Zugriffsdatum: 10.01.20. – Lizenz: Creative Commons <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/de/legalcode>
- [40] WETZEL, S.: *Astronomisches Koordinatensystem des Äquators, ortsfest*. 2009. – URL <https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:%C3%84quSysOrt.svg>. – Zugriffsdatum: 10.01.20. – Lizenz: Creative Commons <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/de/legalcode>
- [41] XIE, K.; YAN, F.; SHARF, A.; DEUSSEN, O.; CHEN, B.; HUANG, H.: Tree Modeling with Real Tree-Parts Examples. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* PP (2015), Dezember, S. 1–12
- [42] YANG, C.; LI, L.: Hormonal Regulation in Shade Avoidance. In: *Frontiers in Plant Science* 08 (2017), September, S. 1527

Eidesstattliche Versicherung (Affidavit)

Jansen, Jana

Name, Vorname
(Last name, first name)

183999

Matrikelnr.
(Enrollment number)

Ich versichere hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit/Masterarbeit* mit dem folgenden Titel selbstständig und ohne unzulässige fremde Hilfe erbracht habe. Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate kenntlich gemacht. Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

I declare in lieu of oath that I have completed the present Bachelor's/Master's* thesis with the following title independently and without any unauthorized assistance. I have not used any other sources or aids than the ones listed and have documented quotations and paraphrases as such. The thesis in its current or similar version has not been submitted to an auditing institution.

Titel der Bachelor-/Masterarbeit*:
(Title of the Bachelor's/ Master's* thesis):

Space Colonization-gestützte Generierung realitätskonformer Vegetationsszenarien

*Nichtzutreffendes bitte streichen
(Please choose the appropriate)

17.02.2020

Ort, Datum
(Place, date)


Unterschrift
(Signature)

Belehrung:

Wer vorsätzlich gegen eine die Täuschung über Prüfungsleistungen betreffende Regelung einer Hochschulprüfungsordnung verstößt, handelt ordnungswidrig. Die Ordnungswidrigkeit kann mit einer Geldbuße von bis zu 50.000,00 € geahndet werden. Zuständige Verwaltungsbehörde für die Verfolgung und Ahndung von Ordnungswidrigkeiten ist der Kanzler/die Kanzlerin der Technischen Universität Dortmund. Im Falle eines mehrfachen oder sonstigen schwerwiegenden Täuschungsversuches kann der Prüfling zudem exmatrikuliert werden. (§ 63 Abs. 5 Hochschulgesetz - HG -).

Die Abgabe einer falschen Versicherung an Eides statt wird mit Freiheitsstrafe bis zu 3 Jahren oder mit Geldstrafe bestraft.

Die Technische Universität Dortmund wird gfls. elektronische Vergleichswerkzeuge (wie z.B. die Software „turnitin“) zur Überprüfung von Ordnungswidrigkeiten in Prüfungsverfahren nutzen.

Die oben stehende Belehrung habe ich zur Kenntnis genommen:

Official notification:

Any person who intentionally breaches any regulation of university examination regulations relating to deception in examination performance is acting improperly. This offense can be punished with a fine of up to €50,000.00. The competent administrative authority for the pursuit and prosecution of offenses of this type is the chancellor of TU Dortmund University. In the case of multiple or other serious attempts at deception, the examinee can also be unenrolled, section 63, subsection 5 of the North Rhine-Westphalia Higher Education Act (*Hochschulgesetz*).

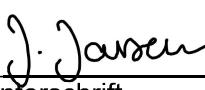
The submission of a false affidavit will be punished with a prison sentence of up to three years or a fine.

As may be necessary, TU Dortmund will make use of electronic plagiarism-prevention tools (e.g. the "turnitin" service) in order to monitor violations during the examination procedures.

I have taken note of the above official notification:**

17.02.2020

Ort, Datum
(Place, date)


Unterschrift
(Signature)

**Please be aware that solely the German version of the affidavit ("Eidesstattliche Versicherung") for the Bachelor's/ Master's thesis is the official and legally binding version.