

Georg-August-Universität Göttingen

Veranstaltung: Seminar Computergrafik

Modul: M.Inf.1261.Mp: Seminar Grafische Datenverarbeitung

Leitung: Prof. Dr. Winfried Kurth

WiSe 2016/2017

Hausarbeit zum Thema

Ein plastisches, dynamisches und reduzibles 3D- Geometriemodell für die Simulation der Blätter grasartiger Pflanzen

eingereicht von:

Name:	Maria Tripel
Matrikelnummer:	21227428
Studiengang:	Master of Education
Fachsemester:	3
Unterrichtsfächer:	Informatik, Mathematik, Russisch
Fakultät:	Zentrale Einrichtung für Lehrerbildung (ZELB)
Adresse:	Hermann-Rein-Straße 8, 37075 Göttingen
E-Mail-Adresse:	maria.tripel@stud.uni-goettingen.de
am:	26.03.2017

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	II
1. Einleitung	- 1 -
2. Aufgabe des Modells	- 2 -
3. Modellbeschreibung	- 4 -
3.1 Modellierung der Blattfläche.....	- 4 -
3.2 Anpassung des Modells.....	- 7 -
3.3 Dynamik der Flächengleichung.....	- 8 -
3.4 Modellierung der Formvielfalt	- 10 -
3.5 Plastische Transformation	- 11 -
3.6 Vereinfachung des Modells.....	- 11 -
4. Implementierung als Komponenten in OpenAlea	- 14 -
5. Zusammenfassung	- 15 -
Literatur- und Quellenverzeichnis.....	IV

Abbildungsverzeichnis und -quellen

- Abbildung 1.** A. Roloff: *Winter-Linde*. 2
Elektronische Quelle: <http://baum-des-jahres.de/index.php?id=173>, Zugriff am 26.03.2017.
- Abbildung 2.** A. Roloff: *Trauben-Eiche*. 2
Elektronische Quelle: <http://baum-des-jahres.de/index.php?id=173>, Zugriff am 26.03.2017.
- Abbildung 3.** C. Fournier & C. Pradal: Links: *Darstellung einer Maispflanze*. Rechts: *Die Draufsicht auf die einzelnen Blätter einer Maispflanze*. 3
Quelle: C. Fournier & C. Pradal: A Plastic, Dynamic and Reducible 3D Geometric Model for Simulating Gramineous Leaves, Figur 1, S. 2. In: The Fourth International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications, S. 125-132. Elektronische Quelle: <https://hal.inria.fr/hal-00788140/file/leafshape.pdf>, Zugriff am 26.03.2017.
- Abbildung 4.** M. Tripel: *Modellierung der Blattfläche*. 5
Quelle: Eigene Darstellung.
- Abbildung 5.** C. Fournier & C. Pradal: Links: *Rotation um die mittlere Blattrippe*. Rechts: *Welligkeit der Blattränder*. 6
Quelle: C. Fournier & C. Pradal: A Plastic, Dynamic and Reducible 3D Geometric Model for Simulating Gramineous Leaves, Figur 3 c, d), S. 6. In: The Fourth International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications, S. 125-132. Elektronische Quelle: <https://hal.inria.fr/hal-00788140/file/leafshape.pdf>, Zugriff am 26.03.2017.
- Abbildung 6.** M. Tripel: *Bedeutung der Variable h*. 9
Quelle: Eigene Darstellung.
- Abbildung 7.** M. Tripel: *Grafische Darstellung des Fehlers ϵ_2^{xy}* 12
Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 8. M. Tripel in Anlehnung an C. Fournier & C. Pradal: *Berechnungszeit in Abhängigkeit von der Anzahl der Dreiecke*..... 13

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an das Diagramm aus dem Paper von C. Fournier & C. Pradal: A Plastic, Dynamic and Reducible 3D Geometric Model for Simulating Gramineous Leaves, Figur 6, S. 7. In: The Fourth International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications, S. 125-132. Elektronische Quelle: <https://hal.inria.fr/hal-00788140/file/leafshape.pdf>, Zugriff am 26.03.2017.

Abbildung 9. C. Fournier & C. Pradal: *Momentaufnahme einer visuellen Sitzung des Modellarbeitsganges*. 14

Quelle: C. Fournier & C. Pradal: A Plastic, Dynamic and Reducible 3D Geometric Model for Simulating Gramineous Leaves, Figur 2, S. 6. In: The Fourth International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications, S. 125-132. Elektronische Quelle: <https://hal.inria.fr/hal-00788140/file/leafshape.pdf>, Zugriff am 26.03.2017.

1. Einleitung

In dieser Arbeit wird ein Geometriemodell zur Simulation der Blätter grasartiger Pflanzen, wie Mais oder Weizen, welches von Christian Fournier und Christophe Pradal unter dem Artikel *A plastic, dynamic and reducible 3D geometric model for simulating gramineous leaves* in *International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications* im Jahr 2012 auf den Seiten 125-132 veröffentlicht wurde, beschrieben. Daher ist jede Tatsache, jede Formel, jede Idee etc., deren Quelle nicht explizit angegeben ist, auf diesen Artikel zurückzuführen. Die Informationen aus diesem Artikel wurden meinerseits aufgearbeitet und mit einigen Zwischenschritten und Abbildungen bereichert. Dabei handelt es sich um ein plastisches, dynamisches und reduzibles 3D-Geometriemodell.

Zuerst wird auf die Aufgabe und die Besonderheiten dieses Modells im Vergleich zu den Geometriemodellen zur Darstellung nicht grasartiger Pflanzen eingegangen. Die genauere Modellbeschreibung findet im darauffolgenden Kapitel statt. Das Modell wird dort von der Grundmodellierung der Blattfläche, über ihre Anpassung bis zu Maßnahmen für die erhöhte Effizienz des Modells beschrieben. Anschließend findet eine Vorstellung der OpenAlea-Plattform, in der das Modell implementiert ist, statt. Zum Schluss erfolgt eine kurze Zusammenfassung der Eigenschaften des Modells.

2. Aufgabe des Modells

Viele Geometriemodelle zur Darstellung von Pflanzen werden so entwickelt, dass sie die Besonderheiten bestimmter Arten von Pflanzen berücksichtigen und wiedergeben. So wird zum Beispiel bei der Simulation von ganzen Bäumen weniger auf die Blattform, sondern mehr auf die Ausrichtung von Ästen geachtet. Denn im Bild eines ganzen Baumes, wie in den Abbildungen 1 und 2 zu sehen ist, sind die Blätter nur sehr schwer erkennbar und die Individualität wird durch die Anordnung, die Form, die Vielfalt, die Länge etc. von Ästen repräsentiert.

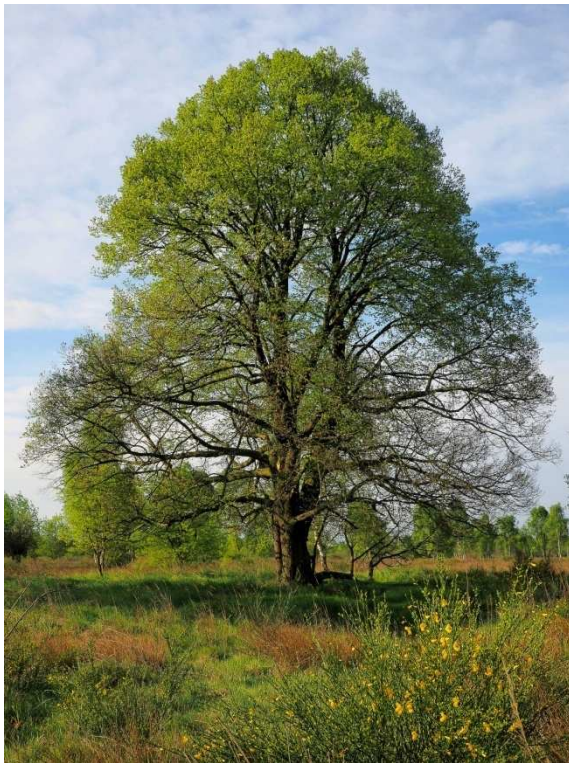


Abbildung 1. *Winter-Linde* [A. Roloff].

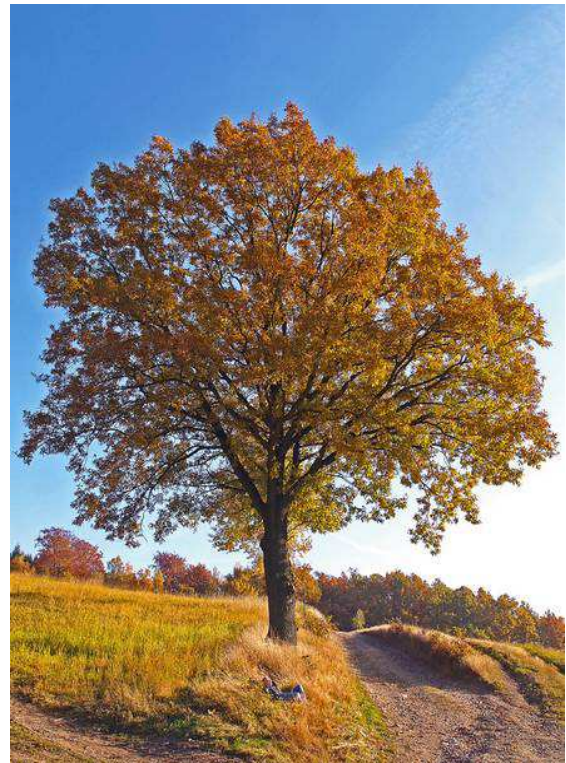


Abbildung 2. *Trauben-Eiche* [A. Roloff].

Im Gegensatz zu solchen Pflanzenarten haben die grasartigen Pflanzen keine Äste. Wie in der Abbildung 3 links zu sehen ist, bestehen solche Pflanzen im Großen und Ganzen, wenn man die Kolben und die Wurzeln nicht berücksichtigt, nur aus Blättern. Daher liegt der Simulationsschwerpunkt bei den grasartigen Pflanzen, wie Mais und Weizen, in der Darstellung ihrer Blätter. Eine solche Simulation einer Maispflanze kann in der Abbildung 3 links betrachtet werden. Auf der rechten Seite der Abbildung 3 sind einzelne Blätter der Maispflanze abgebildet, welche auf der linken Seite ganz dargestellt ist. Zu erkennen ist dabei, dass sich die Blätter in ihrer Länge, Breite, der Form ihrer Ränder, ihrer allgemeinen Form und dem Verlauf der mittleren Blattrippe unterscheiden können. Außerdem ist zu

erkennen, dass sich nicht nur die Blätter einer grasartigen Pflanze im Vergleich zu einer anderen, sondern auch die einzelnen Blätter derselben Pflanze untereinander unterscheiden.



Abbildung 3. Links: *Darstellung einer Maispflanze.* Rechts: *Die Draufsicht auf die einzelnen Blätter einer Maispflanze* [Aus dem Paper von C. Fournier & C. Pradal: A Plastic, Dynamic and Reducible 3D Geometric Model for Simulating Gramineous Leaves, Figur 1, S. 2].

Da das beschriebene 3D-Modell grasartige Pflanzen nachbilden soll, dient es der Blattsimulation. Daher muss es die Blattfläche simulieren, die Rotation des Blattes und die Krümmung der Blattränder wiedergeben, sowie unterschiedliche Blattformen, Umwelteinflüssen und Alterungsprozesse der Pflanze modellieren können. Außerdem soll es zeiteffizient sein. Die einzelnen Schritte zur Blattsimulation, die in diesem Modell erfolgen, werden im nächsten Kapitel genauer beschrieben. Ferner kann das erstellte dynamische, plastische und reduzierbare 3D-Geometriemodell für die Durchführung verschiedener Berechnungen der Blatteffekte, wie die Einflüsse des Lichtes und des Windes auf das Wachstum und die Form der Blätter, genutzt werden.

3. Modellbeschreibung

Wie bereits erwähnt, besteht der Simulationsschwerpunkt grasartiger Pflanzen in der Darstellung der Blätter. Für die Simulation eines Blattes wird zuerst seine Fläche modelliert. Die einzelnen Modellierungsschritte der Blattfläche werden im Abschnitt 3.1 erläutert. Danach wird die modellierte Blattfläche mit Daten, wie die tatsächliche Länge des Blattes und die Variation der Blattbreite, aufgefüllt. Wie diese Anpassung der modellierten Blattfläche an die des Originals erfolgt wird im Abschnitt 3.2 dargestellt. Als nächstes erfolgt die Berücksichtigung des Alterungsprozesses des Blattes. Wie der Alterungsprozess des Blattes in das bereits vorhandene Modell integriert wird, wird im Abschnitt 3.3 gezeigt. Im Abschnitt 3.4 wird auf das bis dahin unberücksichtigte Problem, dass das Modell bei gleichen Startinformationen des Blattes zum gleichen Ergebnis führt, eingegangen. Die plastische Transformation der Blattfläche und die Vereinfachung des Modells werden in den Abschnitten 3.5 und 3.6 beschrieben.

3.1 Modellierung der Blattfläche

Der erste Schritt zur Simulation eines Blattes ist die Modellierung der Blattfläche unabhängig von anderen Informationen. Diese Modellierung geschieht in mehreren Schritten. Zuerst wird der Verlauf der mittleren Blattrippe mathematisch durch eine Kurve in parametrischer Darstellungsform repräsentiert. Danach werden die realitätsbezogenen Veränderungen, wie die Drehung des Blattes entlang der mittleren Blattrippe, die Schwankungen der Blattbreite und der veränderte (wellenförmige) Verlauf der Blattränder, hinzugefügt.

Für die Darstellung der Blattfläche werden zuerst zwei Variablen s und u definiert. Diese sind für die Definition der Funktionen, die für die Simulation der Blattform gebraucht werden, notwendig. Da an dieser Stelle noch keine Informationen des realen Blattes herangezogen werden, wird der Definitionsbereich beider Variablen so einfach wie möglich gehalten – die Intervalllänge beträgt 1. Somit gilt für diese Variablen: $s \in [0, 1]$ und $u \in [-0.5, 0.5]$.

Des Weiteren werden zwei Funktionen definiert:

$$N: [0,1] \rightarrow \mathbb{R}^3, s \mapsto (x(s), 0, y(s)) \quad (1)$$

$$r: [0,1] \rightarrow \mathbb{R}, s \mapsto r(s) \quad (2)$$

Wie in der Abbildung 4 dargestellt ist, handelt es sich bei der Funktion N um eine zweidimensionale Kurve, die zur Darstellung des Verlaufs der mittleren Blattrippe dient. Die Funktion r repräsentiert die Veränderung der Blattbreite, welche orthogonal zu der Kurve der mittleren Blattrippe liegt.

Zur Repräsentation der Blattform wird der absolute Rahmen $(0, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ mit dem Ursprung im Nullpunkt und den Einheitsvektoren \vec{i}, \vec{j} und \vec{k} definiert. Ferner werden der Rotationsrahmen R und ein Segment P definiert. Sei $P: (s, u) \mapsto r(s)u\vec{j}$ ein Querschnitt der Länge $r(s)$, dann ergibt sich die Blattfläche

$$S(s, u) = N(s) + R(s)P(s, u) \quad (3)$$

durch das Umfassen von P und der ermittelten Kurve der mittleren Blattrippe N unter der Berücksichtigung der Drehung R .

Nun wird zuerst die Rotation außer Acht gelassen, d.h. es wird davon ausgegangen, dass das Blatt sich entlang der mittleren Blattrippe nicht gedreht hat. Dann ist die Rotation gleich der Einheitsmatrix

$$R = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

und für den rechten Summanden der Blattflächengleichung (3) gilt

$$R(s)P(s, u) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} r(s)u\vec{j} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} r(s)u \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ r(s)u \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Also ergibt sich im Falle keiner Blattdrehung aus (1), (3) und (4) für die Blattfläche:

$$\forall s \in [0,1], \forall u \in [-0.5,0.5] \text{ gilt } S(s, u) = (x(s), r(s)u, y(s)) \quad (5)$$

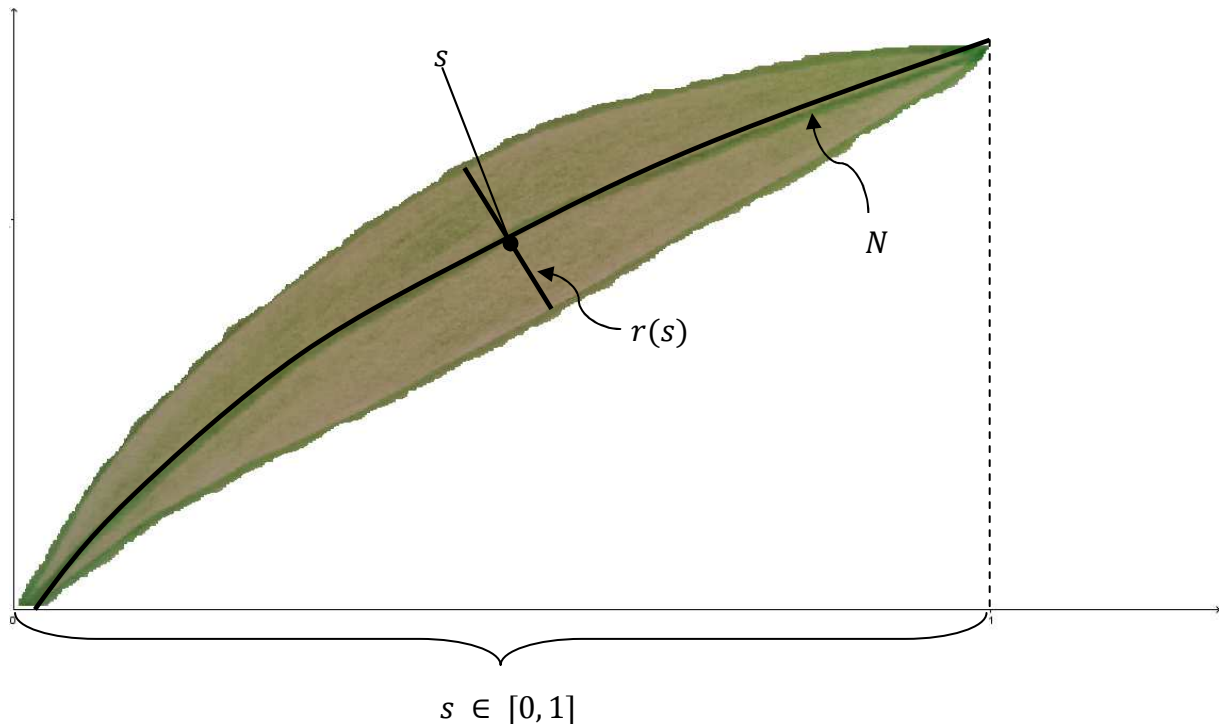


Abbildung 4. Modellierung der Blattfläche [eigene Darstellung].

Nun soll die Drehung des Blattes, wie sie etwa in der Abbildung 5 links dargestellt ist, berücksichtigt werden. Diese wird als Rotation um die y -Achse mit dem Rotationswinkel $\theta(s)$ durch die Funktion

$$R: s \mapsto (\cos(\theta(s)), 0, \sin(\theta(s)))$$

gegeben. Die Gleichung der Blattfläche lautet dann wie folgt:

$$S(s, u) = (x(s) + r(s) \cos(\theta(s)) u, r(s) u, y(s) + r(s) \sin(\theta(s)) u) \quad (6)$$

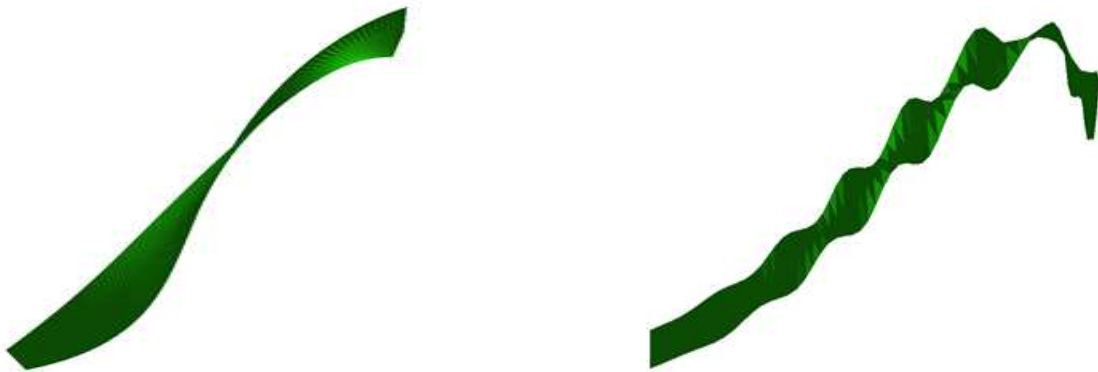


Abbildung 5. Links: *Rotation um die mittlere Blattrippe.* Rechts: *Welligkeit der Blattränder.*
[Aus dem Paper von C. Fournier & C. Pradal: A Plastic, Dynamic and Reducible 3D Geometric Model for Simulating Gramineous Leaves, Figur 3 d) und c), S. 6].

Neben der Rotation sollen auch andere Effekte des Blattes modelliert werden. Zu einem solchen Effekt gehört die Welligkeit der Blattränder, wie in der Abbildung 5 rechts dargestellt. Für die Darstellung verschiedener Effekte wird die bereits ermittelte Gleichung (6) der Blattfläche genutzt. Da diese speziell für die Rotation ermittelt wurde, muss sie zuerst verallgemeinert werden, um andere Effekte darstellen zu können. Dafür werden drei Funktionen f , g und h , welche von den Variablen s und u abhängen, definiert. Somit lautet die allgemeine Form der Gleichung zur Darstellung der Blattfläche:

$$S(s, u) = (x(s) + f(s, u), h(s, u), y(s) + g(s, u)) \quad (7)$$

Je nach Effekt müssen diese drei Funktionen speziell berechnet werden. Im Falle der Rotation wurden diese bereits ermittelt und sehen folgendermaßen aus:

$$f(s, u) = r(s) \cos(\theta(s)) u$$

$$h(s, u) = r(s) u$$

$$g(s, u) = r(s) \sin(\theta(s)) u$$

Somit wurde das Grundgerüst zur Simulation grasartiger Pflanzen, nämlich die Modellierung der Blattfläche, erarbeitet. An die Realisierung verschiedener Effekte wurde auch gedacht.

3.2 Anpassung des Modells

Nachdem die, von einem bestimmtem Blatt unabhängige, Blattfläche modelliert wurde, wird sie an das konkrete Modell eines bestimmten Blattes angepasst. Hierbei werden die Länge der Kurve der mittleren Blattrippe und die Variation der Blattbreite angeglichen. Diese Daten können sowohl aus den Blattuntersuchungen als auch aus den Digitalisierungsinformationen eines Blattes erhalten werden.

Dafür wird zuerst die Variable s , die vorher die Werte zwischen 0 und 1 angenommen hat, angepasst, weil die relevanten Funktionen für die Modellierung der Blattfläche über s definiert wurden. Ferner wird die mittlere Blattrippe stückweise linear konstruiert. Jeder Punkt s_i auf der mittleren Blattrippe wird durch die Aufsummierung der Steigungen zwischen jeweils zwei benachbarten Punkten (x_{j-1}, y_{j-1}) und (x_j, y_j) bis zu der i -ten Stelle berechnet. Die Rechnung sieht folgendermaßen aus:

$$s_i = \sum_{j=1}^i ds_j = \sum_{j=1}^i \sqrt{(x_j - x_{j-1})^2 + (y_j - y_{j-1})^2}$$

Ferner werden die einzelnen Funktionen, die für die Darstellung der Blattfläche verwendet wurden, parametrisiert. Da die Funktionen f , g und h von der Funktion r abhängen, werden diese durch die Parametrisierung der Funktion r mit angepasst. Daher müssen für die Parametrisierung der Blattfläche lediglich die Funktionen N und r parametrisiert werden (vgl. (7)).

Im Folgenden wird die Gesamtlänge des Blattes mit L bezeichnet. Da die 0-Komponente der Funktion N sich durch die Parametrisierung nicht verändern wird, wird sie außer Acht gelassen. Somit sieht die Parametrisierung der Kurve N folgendermaßen aus:

$$\forall s \in [0, L] \text{ gilt } N'(s) = \left(\frac{x\left(\frac{s}{L}\right)}{L}, \frac{y\left(\frac{s}{L}\right)}{L} \right)$$

Im nächsten Schritt wird die Funktion N normiert. Dafür wird eine Variable s' mit $s' = \frac{s}{L}$ definiert. Die normierte Funktion N' lautet wie folgt:

$$\forall s' \in [0,1] \text{ gilt } N'(s') = \left(\frac{x(s')}{L}, \frac{y(s')}{L} \right)$$

Nun muss nur noch die Funktion r angepasst werden. Da r nur von s abhängt, wurde diese automatisch durch die stückweise lineare Konstruktion der mittleren Blattrippe angepasst. Daher muss sie nur noch normiert werden. Da $r(s)$ die Veränderung der Blattbreite an einer Stelle s , welche orthogonal zu der Kurve der mittleren Blattrippe liegt, repräsentiert, erfolgt

ihre Normierung durch die Betrachtung der vorher ermittelten Blattfläche. Diese Blattfläche ist gegeben durch

$$surface_{leaf} = \int_0^1 r(t) dt$$

Demzufolge lautet die Normierung von $r(s)$

$$\forall s \in [0,1] \text{ gilt } r'(s) = \frac{r(s)}{\int_0^1 r(t) dt}$$

An dieser Stelle wurden die realen Daten, wie die Länge und die Veränderung der Breite des Blattes, in das vorher bestandene Modell der Blattfläche integriert.

3.3 Dynamik der Flächengleichung

Nachdem die Größe und die Form der Blattfläche an das Original angepasst wurden, werden weitere Anpassungen des Modells an die Realität unternommen. Zu einer solchen Eigenschaft eines realen Blattes zählt der Alterungsprozess. Die Idee dabei ist es, dass jede reale Pflanze wie alles „Lebendige“ altert, d.h. sich mit der Zeit verändert. Also bringt der Alterungsprozess des Blattes die Veränderung bestimmter Eigenschaften mit sich, welche zu einem bestimmten Zeitpunkt i betrachtet werden. Die Berücksichtigung des Alterungsprozesses des Blattes bei der Gleichung der Blattfläche wird als *Dynamik der Flächengleichung* bezeichnet und in diesem Abschnitt erläutert.

Im Folgenden wird mit $N^i(s)$ die Kurve der mittleren Blattrippe zum Zeitpunkt i beschrieben. Wie aus der Flächengleichung (7) des Blattes bekannt ist, wird die Gleichung der Blattfläche mit Hilfe der Funktionen $N(s)$, $f(s, u)$, $g(s, u)$ und $h(s, u)$ dargestellt. Ferner werden die drei Funktionen $f(s, u)$, $g(s, u)$ und $h(s, u)$ durch die Funktion $r(s)$ ausgedrückt. Daher kann die Gleichung der Blattfläche, welche den Alterungsprozess des Blattes berücksichtigt, durch die Kombination von $r(s)$ mit verschiedenen $N^i(s)$ erhalten werden.

Für die Simulation der Pflanzen, deren Reifungslänge, also die endgültige Blattlänge, bekannt ist, kann das physiologische Alter durch $\frac{l}{L}$ angenähert werden. Dabei wird durch l die aktuelle Länge und mit L die Länge des ausgewachsenen Blattes bezeichnet. Die Anpassung der Funktion $r(s)$ wird $r(age)$ genannt. Für die Blattkurve wird eine Sammlung normalisierter Kurven $N(age, s)$ betrachtet.

Da die Spitze eines Blattes in seiner früheren Wachstumsphase fertiggewachsen ist und in den weiteren Phasen des Wachstums sich nur der untere Teil (weiter *Basis* genannt) des Blattes

ändert¹, wird die Spitze des Blattes bei der Entwicklung der dynamischen Flächengleichung nicht berücksichtigt. Wie in der Abbildung 6 gezeigt, wird die Abgrenzungsstelle zwischen der Spitze und der *Basis* des Blattes mit h bezeichnet. Somit wird zu einem bestimmten Zeitpunkt nur das Intervall $[0, h]$, also $s \in [0, h]$, betrachtet. Der Bereich der Blattspitze wird durch $l - h$ angegeben. Auch bei der Variation der Blattbreite muss der Bereich der Blattspitze nicht beachtet werden. Daher gilt für die entsprechende Funktion $r(s + l - h)$.

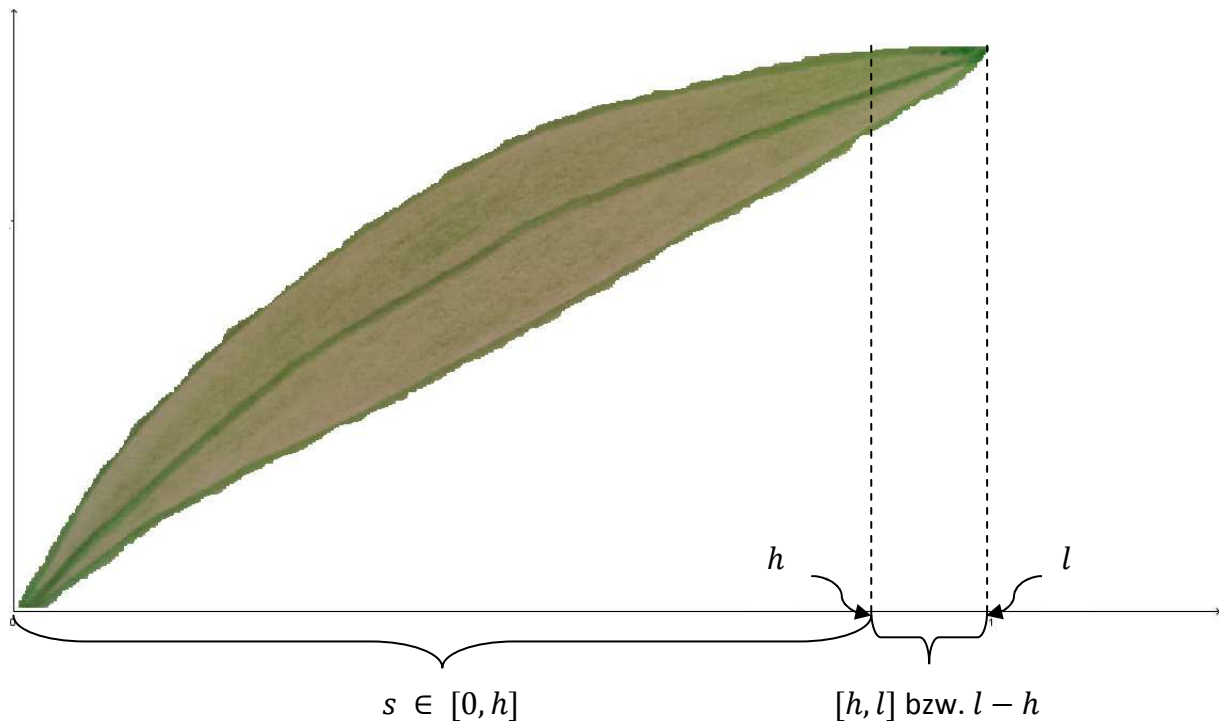


Abbildung 6. Bedeutung der Variable h [eigene Darstellung].

Der Wert von h ist an dieser Stelle noch unbekannt. Da das physiologische Alter neben der Annäherung $\frac{l}{L}$ auch durch die Berechnung des Integrals

$$\int_0^h \sqrt{\left(\frac{dx(t)}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy(t)}{dt}\right)^2} dt$$

ermittelt werden kann, kann der Wert von h durch die folgende Gleichung berechnet werden:

$$\int_0^h \sqrt{\left(\frac{dx(t)}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy(t)}{dt}\right)^2} dt - \frac{l}{L} = 0$$

Ferner werden für die dynamische Flächengleichung die Informationen über die erwartete maximale Blattbreite R , das Maximum r_{max} von $r(s)$ und die bereits erwähnte Länge des

¹ Vgl. A. W. Eichler: *Zur Entwicklungsgeschichte des Blattes mit besonderer Berücksichtigung der Nebenblatt-Bildungen*, S. 7.

ausgewachsenen Blattes L benötigt. Somit sieht die dynamische Flächengleichung wie folgt aus:

$$\forall s \in [0, h], \forall u \in [-0.5, 0.5] \text{ gilt}$$

$$S'(s, u) = \left(x(s)L, r(s + l - h) \frac{R}{r_{max}} u, y(s)L \right) \quad (8)$$

Mit Hilfe dieser Gleichung kann nun der Alterungsprozess des Blattes mit modelliert werden.

3.4 Modellierung der Formvielfalt

In den vorherigen Abschnitten wurde ein Modell zur Simulation der Blattform, welche die Drehung der Blattfläche, die Welligkeit der Blattränder, die Länge der mittleren Blattrippe, die Variation der Blattbreite und den Alterungsprozess des Blattes berücksichtigt, erstellt. Allerdings besteht noch das Problem, dass bei den gleichen Startinformationen das Ergebnis der Modellierung gleich aussieht. Auf die Lösung dieses Problems wird in diesem Abschnitt eingegangen.

Wie gehabt, wird für die Simulation verschiedener Blätter die gleiche vordefinierte Blattriefe betrachtet. Um das beschriebene Problem zu lösen, werden bestimmter Faktoren während der Simulation vom Nutzer geändert. Dafür werden zuerst die dynamischen Gleichungen der Variation der Blattbreite $r(age)$ und die Funktion für die mittlere Blattrippe $N(age, s)$ in einer differenziellen Form dargestellt. Somit wird die Funktion $r(age)$ zu $\frac{dr}{dage} = f(age)$ abgeleitet. Die Kurve $N(age, s)$ wird durch das Einsetzen einer Menge von Kurven der mittleren Blattrippe an unterschiedlichen Alterszeitpunkten, entweder direkt oder durch die abgeleitete Form $\theta(age, s) = \frac{dN}{ds}(age, s)$ errechnet.

Die Aufgabe des Nutzers besteht nun darin, in jeder Zeitstufe der Simulation (dt), verschiedene unabhängige Faktoren zu definieren. Bei diesen Faktoren handelt es sich um die Wachstumsschnelligkeit $\left(\frac{dage}{dt}\right)$, die Veränderung bezüglich der Länge der mittleren Blattrippe $\left(\frac{dl}{dt}\right)$, die Variation der Blattbreite $\left(\frac{dr}{dt}\right)$ und die Variation der Rippenbiegung $\left(\frac{d\theta}{dage}\right)$. Diese Anpassungen der Blatteigenschaften durch den Nutzer ermöglichen eine individuelle Darstellung der Blätter beim gleichen „Grundgerüst“.

3.5 Plastische Transformation

Unter plastischer Transformation werden Modifizierungen solcher Veränderungen der Blattform verstanden, welche aufgrund von Umwelteinflüssen an lokalen Stellen der Pflanze zustande kommen. Zu solchen Umwelteinflüssen gehören die Windstärke und die Lichtintensität.

Für die Berücksichtigung solcher Umwelteinflüsse in der Simulation wird zuerst der Winkel $\theta(s)$ berechnet und das Blatt in Intervalle aufgeteilt. Der Winkel kann dann für jedes Intervall spezifiziert werden. Dies kann sowohl an der Stelle s als auch an $r(s)$ geschehen. Durch solch eine Winkelveränderung an einer lokalen Stelle des Blattes, kann zum Beispiel eine Delle als Folge eines zu starken Winddruckes an dieser Stelle modelliert werden.

Die plastische Transformation der Blattformen in der Simulation kann auch für die Berechnungen der Intensität der Umwelteinflüsse im Falle bestimmter Winkelveränderungen verwendet werden. Also um herauszufinden, wie stark zum Beispiel der Windeinfluss an einer lokalen Blattstelle sein muss, damit eine bestimmte Winkelveränderung zustande kommen kann.

3.6 Vereinfachung des Modells

In diesem Abschnitt geht es darum, das vorhandene Modell effizienter zu machen. Dafür wird das 3D-Modell aus Dreiecken aufgebaut. Diese Dreiecke werden zu Polygonen zusammengefasst. Die Vereinfachung des Modells geschieht durch die Reduktion der Anzahl verwendeter Dreiecke zur Darstellung der Blattform.

Die erste Reduzierung geschieht durch das Ausschalten optionaler Bestimmungen der Blattfläche, wie die Rotation des Blattes oder die Welligkeit der Blattränder. Da die Veränderungen an der Kurve der mittleren Blattrippe zur Veränderungen an der Blattfläche führen, geschieht die weitere Reduzierungsstufe an der Kurve der mittleren Blattrippe. Dieser Reduktionsschritt erfolgt in Form eines Algorithmus. Dafür werden einige Punkte, die für die Kurvendarstellung genutzt werden, entfernt. Für die Auswahl des zu entfernenden Punktes wird ein Fehler von x , y und r berechnet, der durch diese Entfernung zur Stande kommen würde. Dieser soll nämlich minimal wie möglich gehalten werden, denn so wird die maximale Anzahl an Hauptcharakteristika der Blattfläche erhalten.

Dem Algorithmus wird eine Anzahl an Polygonen geliefert. Danach wird die Kurve der mittleren Blattrippe in diskrete Punkte verwandelt. Für alle Punkte s_i wird der Fehler der Entfernung von $x_i(s_i)$, $y_i(s_i)$ und $r_i(s_i)$ berechnet. Im Folgenden werden mit $P_i(x_i, y_i)$ und $R_i(s_i, r_i)$ zwei Mengen von Punkten bezeichnet, die sich aus der diskreten Darstellung ihrer

Kurven ergeben. Ferner wird der Fehler an der Kurve $N(s)$ als ε^{xy} , und der Fehler an der Kurve $r(s)$ als ε^r bezeichnet. Die Berechnung dieser beiden Fehler an der Stelle i , wobei $i \in]1, n[$ und n die Anzahl aller diskreten Punkte ist, erfolgt durch die Ermittlung des Abstandes des i -ten Punktes und der Strecke durch den $(i - 1)$ -ten und $(i + 1)$ -ten Punkt der jeweiligen Menge. Die Rechnungsvorschrift sieht folgendermaßen aus:

$$\varepsilon_i^{xy} = \text{distance}(P_i, \overline{P_{i-1}P_{i+1}}) \quad (9)$$

$$\varepsilon_i^r = \text{distance}(R_i, \overline{R_{i-1}R_{i+1}}) \quad (10)$$

Zur Veranschaulichung ist in der Abbildung 7 die Bedeutung des Fehlers ε_2^{xy} grafisch dargestellt.

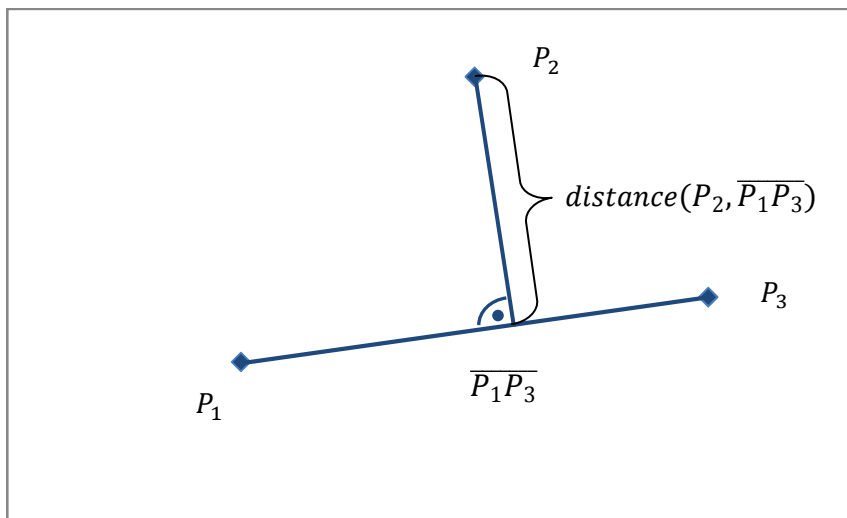


Abbildung 7. Grafische Darstellung des Fehlers ε_2^{xy} [eigene Darstellung].

Das Quadrat des Fehlers an der i -ten Stelle, der durch die Entfernung eines bestimmten Punktes an der Fläche entsteht, ergibt sich aus der Summe der Quadrate der beiden Fehler (9) und (10) zu

$$\forall i \in]1, n[\text{ gilt } \varepsilon_i = \sqrt{(\varepsilon_i^{xy})^2 + (\varepsilon_i^r)^2}$$

Nachdem die drei Fehler für alle Punkte berechnet wurden, werden die Punkte zusammen mit der Information über den durch ihre Entfernung verursachten Fehler in eine Heap-Liste gespeichert. Diese Liste wird durchlaufen und der Punkt mit dem kleinsten Fehler wird entfernt. Daraufhin werden die Fehler seiner Nachbarn aktualisiert und die Liste wird erneut durchlaufen. Dies geschieht solange, bis die Anzahl der entfernten Punkte mit der angeforderten Anzahl an Punkten (Input des Algorithmus) übereinstimmen. Zum Schluss wird die Fläche des Blattes erstellt. Für die Effizienz gilt nun, mit je weniger Dreiecken das Modell erstellt wird, desto schneller erfolgt die Simulation. Um sich dieser Abhängigkeit der Rechenzeit und der Anzahl der Dreiecke zur Repräsentation der Blattfläche bewusst zu

werden, wurde eine Übersicht für die ersten 2^7 Dreiecke in der Abbildung 8 abgebildet. Dabei ist kein linearer, sondern eher ein exponentieller Verlauf zu betrachten.

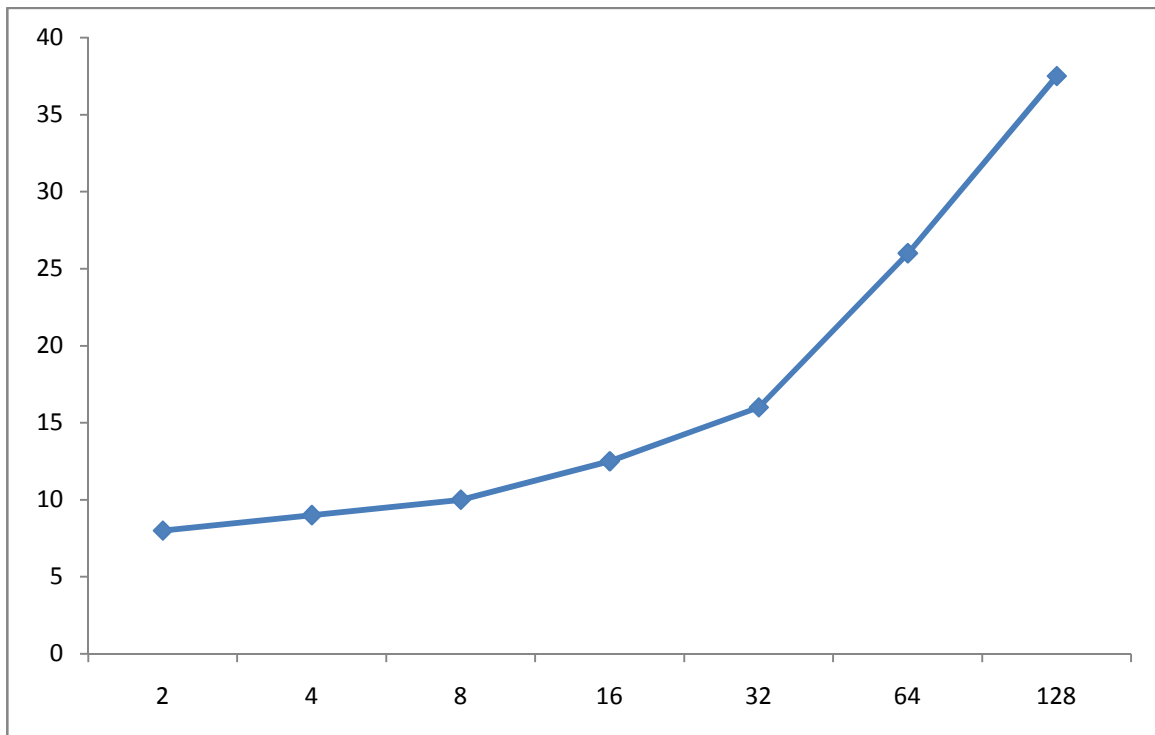


Abbildung 8. *Berechnungszeit in Abhängigkeit von der Anzahl der Dreiecke* [eigene Darstellung in Anlehnung an das Diagramm aus dem Paper von C. Fournier & C. Pradal: A Plastic, Dynamic and Reducible 3D Geometric Model for Simulating Gramineous Leaves, Figur 6, S. 7].

4. Implementierung als Komponenten in OpenAlea

Das, in früheren Kapiteln vorgestellte, plastische, dynamische und reduzierbares 3D-Geometriemodell zur Darstellung der Blätter grasartiger Pflanzen wird im Programm *OpenAlea* implementiert. Bei *OpenAlea* handelt es sich um eine Programmplattform, die aus einem System, einem modularen Aufbau, einer grafischen Programmieroberfläche und „einer Schnittstelle für verschiedene Forschungsgruppen zur leichten Zusammenarbeit“² besteht.³

Die Erstellung des 3D-Geometriemodells erfolgt komponentenweise. Die notwendigen Komponenten können vom Nutzer ausgewählt und angepasst werden. Eine mögliche Nutzung dieser Plattform zur Erstellung eines Modells ist in der Abbildung 9 zu sehen. Die einzelnen Komponenten sind in Form von Bausteinen mit entsprechenden Input- und Output-Zugängen, die miteinander verknüpft werden können, dargestellt. Ferner stellt das Programm verschiedene Ansichtsmöglichkeiten, wie zum Beispiel eine 2D-Ansicht der Kurve der mittleren Blattrippe oder die 3D-Ansicht der erstellten Blattsimulation, zur Verfügung.

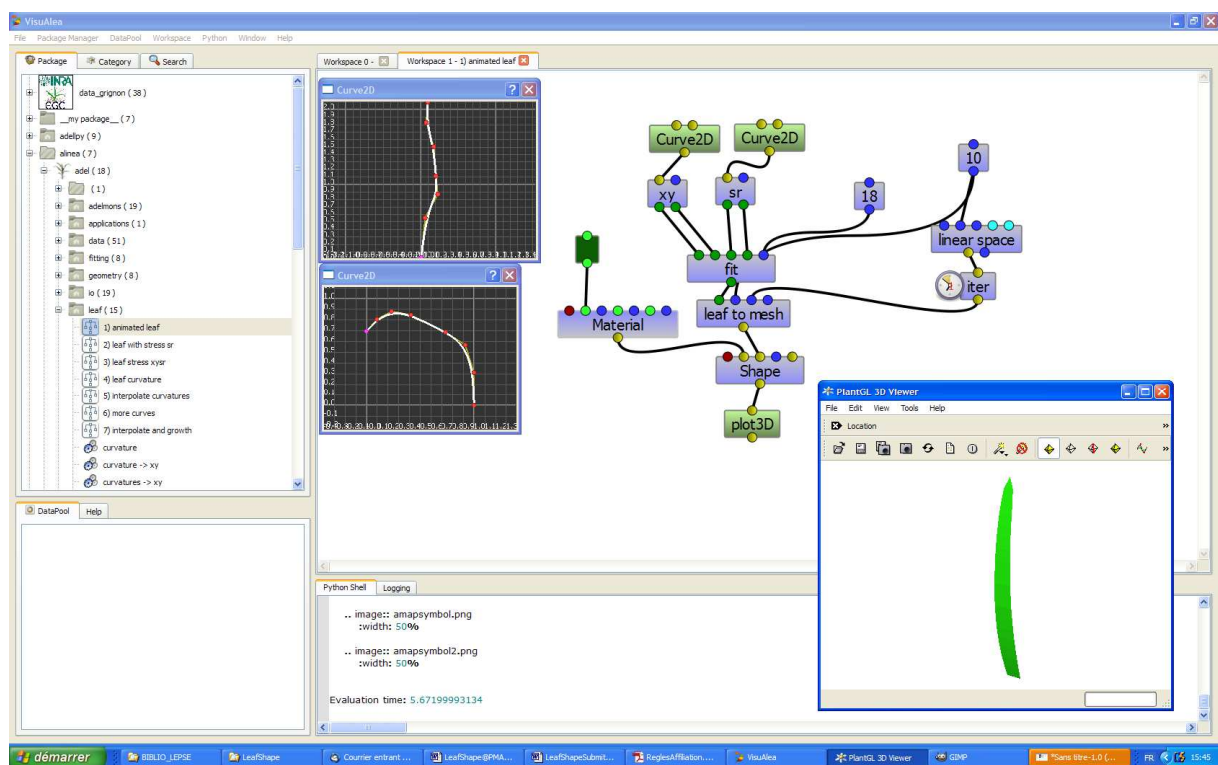


Abbildung 9. Momentaufnahme einer visuellen Sitzung des Modellarbeitsganges [Aus dem Paper von C. Fournier & C. Pradal: A Plastic, Dynamic and Reducible 3D Geometric Model for Simulating Gramineous Leaves, Figur 2, S. 6].

² W. C. Scheinost: *3D-Pflanzendigitalisierung. Erstellung eines dreidimensionalen Gehölzmodells unter Verwendung eines elektromagnetischen Digitalisierungsinstrumentes*, S. 60.

³ Vgl. ebd., S. 60.

5. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein 3D-Geometriemodell für die Simulation von Blättern der grasartigen Pflanzen, wie Mais und Weizen, vorgestellt. Angefangen von der Grundlage, der Darstellung einfacher Blattformen, wurde das Modell mit Daten aufgefüllt, um verschiedene Effekte des Blattes, wie die Drehung, die Welligkeit der Blattränder und die Auswirkungen der Umwelteinflüsse, darstellen zu können. Dabei wurde besonders viel Wert auf die mathematischen Berechnungen gelegt, um die Arbeitsweise des Modells nahezulegen. Ferner wurde bei der Implementierung auf die Benutzerfreundlichkeit geachtet. Dank der grafischen Darstellung der Programmplattform und dem komponentenweisen Aufbau des Modells kann der Nutzer die Blattmodelle auch ohne tiefere mathematische Kenntnisse über die Realisierung einzelner Merkmale erstellen.

Mit diesem Geometriemodell kann ein einfaches Blatt samt seiner Daten, wie die Länge und die Variation der Blattbreite, simuliert werden. Ferner können die Drehung des Blattes um seine mittlere Blattrippe und die Welligkeit der Blattränder im Modell realisiert werden. Auch der Alterungsprozess der Pflanze und die unterschiedlichen Blattformen können dargestellt werden. Des Weiteren kann die Details-Ebene der Simulation ausgewählt und die Berechnungszeit kann durch die Verringerung der Anzahl von Repräsentationsdreiecken optimiert werden. Die Auswirkungen verschiedener Umwelteinflüsse, wie die Windstärke und die Intensität des Lichts, können nicht nur nachgeahmt, sondern auch initiiert werden, um bestimmte Informationen, zum Beispiel über die Pflege der Pflanze, zu erhalten.

Literatur- und Quellenverzeichnis

A. W. Eichler: *Zur Entwicklungsgeschichte des Blattes mit besonderer Berücksichtigung der Nebenblatt-Bildungen*. N. G. Elwert'sche Universitäts-Buchhandlung, Marburg 1861.

C. Fournier & C. Pradal: *A plastic, dynamic and reducible 3D geometric model for simulating gramineous leaves*. In: International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications, 2012, S. 125-132. Elektronische Quelle: <https://hal.inria.fr/hal-00788140/file/leafshape.pdf>, Zugriff am 26.03.2017.

W. C. Scheinost: *3D-Pflanzendigitalisierung. Erstellung eines dreidimensionalen Gehölzmodells unter Verwendung eines elektromagnetischen Digitalisierungsinstrumentes*. Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau Department für Bautechnik und Naturgefahren Universität für Bodenkultur Wien, September 2012. Elektronische Quelle: https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0ahUKEwjy5zGuLSAhVCWSwKHTZqBXEQFgghMAE&url=https%3A%2F%2Fzidapps.boku.ac.at%2Fabstracts%2Fdownload.php%3Fdataset_id%3D9674%26property_id%3D107&usg=AFQjCNGX7o49bIp8mVMYBecmOdrY1RJqEA, Zugriff am 26.03.2017.