

3d – Pflanzendigitalisierung

Erstellung eines dreidimensionalen Gehölzmodells unter Verwendung
eines elektromagnetischen Digitalisierungsinstrumentes

3d – Plant digitalization

Creation of a three-dimensional woody plant model by using an electromagnetic digitizer

Masterarbeit eingereicht von:

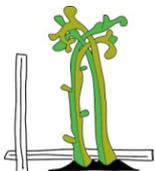
Bakk. techn. Walter Christian Scheinost

Betreuer:

O.Univ. Prof. Dr.phil. Florin Florineth

Univ. Ass. DI Dr.nat.techn. Johann Peter Rauch

DI Clemens Weissteiner



Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau
Department für Bautechnik und Naturgefahren
Universität für Bodenkultur



Wien, September 2012

Danke...

... an meine Betreuer

für die technische, konstruktive und menschliche Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit und das Vertrauen, das sie mir entgegengebracht haben

... an meine Familie

für die Ermöglichung meines Studiums und für die Gewissheit einen Platz der Ruhe und Erholung zu besitzen

... an meine Freunde

für neue Impulse, andere Perspektiven und Zerstreuungen aller Art (F.O.B.)

Zusammenfassung

Das Gelingen von ingenieurb biologischen Maßnahmen ist mit der Entwicklung der verwendeten Pflanzen abhängig. Eine Möglichkeit zur Darstellung und Analyse dieses dynamischen Vorganges ist, die lebenden Baustoffe in festgelegten zeitlichen Abständen dreidimensional zu digitalisieren und virtuelle Modelle zu erstellen.

Zur Aufnahme einer Versuchspflanze wurde ein elektromagnetisches Digitalisierungsinstrument herangezogen. Im Zuge dieser Arbeit wird diese Aufnahmemethode bereits gängigen Verfahren der Modellerstellung in der Fotogrammetrie und Laserscanning gegenübergestellt und es werden Vor- und Nachteile des jeweiligen Systems herausgearbeitet. Insbesondere in Hinblick auf Okklusion, der Abdeckung der Pflanze durch Äste und Blätter, besitzt das elektromagnetische System Vorteile, da es ohne optische Komponenten arbeitet. Nachteilig sind jedoch der begrenzte Operationsradius von rund 4 Metern, sowie die Sensibilität dieser Methode auf elektrische und metallische Gegenstände in der Messumgebung.

Die Erfassung der Pflanze wurde mit Hilfe des Programmes PiafDigit durchgeführt. Somit bestand die Möglichkeit, die erhobenen Rohdaten in ein für das Visualisierungsprogramm VisuAlea, „verständliches“ Format zu exportieren und ein dreidimensionales, geometrisches Modell einer Eberesche (*Sorbus aucuparia*) zu erstellen. Neben der Darstellung der originalen Pflanze konnte durch wiederholtes Digitalisieren im Zeitraum zwischen 2010 und 2011 ein Zuwachs des Volumens von 14% innerhalb einer Vegetationsperiode errechnet werden.

Schlüsselwörter: Digitalisierung, 3d-Modellierung, Topologie, Elektromagnetismus,
Eberesche, *Sorbus aucuparia*

Abstract

The success of soil bioengineering measures depends on the development of the used plants. For analytical and representative purposes of this dynamic process, repeated digitalizations of these living construction materials were conducted and virtual models have been created.

For measuring the test plant, an electromagnetic digitizer was used. In the course of this thesis, the applied method has been compared with image-based methods and laser scanning, two other common techniques for plant modeling, based on optical components. It turned out that the electromagnetic digitizer possesses its main advantage in not to be affected by occlusion of the plant through parts of it, like stems and leaves. Its main disadvantages lie in the limited operational radius and the sensitivity to electric and metallic materials in the environment.

Regarding the possibilities of the digitizer, we succeeded to create a complete geometric copy of the plant, using the computer programs PiafDigit for measuring the three-dimensional coordinates and VisuAlea for visualization purposes. Based on consecutive measurements within the years 2010 and 2011, we also were able to calculate the plant volumes at different points in time and observed a 14% increment of the volume during one vegetation period.

Keywords: digitalization, 3d-modeling, topology, electromagnetism, European mountain-ash, *Sorbus aucuparia*

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	13
1.1. Problemstellung	13
1.2. Ziel der Arbeit	14
1.3. Herangehensweise	14
2. Definitionen	17
2.1. Ordnungsgemäßer Aufbau von Pflanzen	17
2.2. Topologie einer Pflanze	18
2.2.1. Modularer Aufbau von Pflanzen	18
2.2.2. Wachstum von ordnungsgemäßen Strukturen	19
2.3. Multiscale Tree Graph (mtg)	20
2.3.1. Modulare Abhängigkeiten	20
2.3.2. Beschreibung der Topologie – Erstellung eines mtg's	22
2.4. Geometrisches Modell	23
2.5. Berechnete Computermodelle – L-Systeme	23
2.6. Euler-Winkel	24
3. Gängige Methoden der Pflanzenaufnahme	25
3.1. Fotografie-basierten Methoden	25
3.1.1. Aufnahme	25
3.1.2. Modellierung	25
3.1.3. Genauigkeit, Auflösung und Fehler	27
3.1.4. Ergebnis	27
3.2. Laserscanner	27
3.2.1. Aufnahme	28
3.2.2. Modellierung	28
3.2.3. Genauigkeit, Auflösung und Fehler	29
3.2.4. Ergebnis	30
3.3. Elektromagnetisches Digitalisierungsinstrument	30
3.3.1. Aufnahme	31
3.3.2. Modellierung	32
3.3.3. Genauigkeit, Auflösung und Fehler	32
3.3.4. Ergebnis	33
4. Gegenüberstellung der Aufnahmemethoden	35
4.1. Größe des aufzunehmenden Objektes	35
4.2. Auswirkung der Messumgebung auf die Aufnahme	36
4.3. Benötigte Zeit für Aufbau und Messung / Anzahl der benötigten Personen	37
4.4. Okklusion von Pflanzenteilen	38
4.5. Benötigte Zeit für die Modellierung	38
4.6. Genauigkeit des Pflanzenmodells	39
4.7. Datenmenge	39
4.8. Zusammenfassung	40
5. Die Pflanzendigitalisierung	43
5.1. Beschreibung der verwendeten Komponenten	43
5.1.1. Das elektromagnetische Digitalisierungsinstrument (Polhemus Fastrak)	43
5.1.2. Das Digitalisierungsprogramm (PiafDigit)	50
5.1.3. Die Versuchspflanze (Eberesche – <i>Sorbus aucuparia</i>)	51

5.2.Vorarbeiten	51
5.2.1.Aufbau	51
5.2.2.Einstellungen und Umgebungsevaluierung	51
5.3.Pflanzenaufnahme	52
5.3.1.Zwischenergebnis	54
5.4.Nachbearbeitung - Koordinatentransformation	54
5.4.1.Drehen der Punkte	56
5.4.2.Hinzufügen des halben Stammdurchmessers	57
5.4.3.Wiederherstellung der Ausgangskordinatensysteme	58
6.Die Visualisierung	59
6.1.OpenAlea	60
6.1.1.VisuAlea	60
6.2.Modellerstellung	63
7.Die Ergebnisse	65
7.1.Darstellung des Pflanzenmodells	66
7.2.Erste Versuche – Festlegen der Messgenauigkeiten	69
7.3.Vergleich: Virtuelles Modell – Reale Pflanze	70
7.4.Darstellung der Durchmesserklassen	72
7.5.Entwicklung der Pflanze innerhalb einer Vegetationsperiode	73
7.5.1.Aufnahme April 2010	73
7.5.2.Aufnahme April 2011	74
7.5.3.Unterschied der Durchmesserklassen	75
7.5.4.Volumenzuwachs	76
8.Conclusio und Ausblick	79
9.Verzeichnisse	81
9.1.Literaturverzeichnis	81
9.2.Internetquellen	85
9.3.Tabellenverzeichnis	86
9.4.Formelverzeichnis	86
9.5.Abbildungsverzeichnis	87
A. Anhang	93
A - 1. Details zur Beschreibung der L-Systeme	95
A - 1.1. Methode der Erstellung und Formalismen	95
A - 1.2. Überschreibende Systeme (Rewriting systems)	96
A - 2. Spezielle Details zu den Fastrak Konfigurationen	103
A - 2.1. Konfiguration via HyperTerminal	103
A - 2.2. Konfiguration via Graphical User Interface	106
A - 3. Spezielle Details zu OpenAlea	107
A - 3.1. Programmieren in VisuAlea	107
A - 3.2. Programmcode zur Berechnung des Volumens	111
A - 4. Aufschlüsselung der Messergebnisse	113
A - 4.1. mtg-Datei: Erste Messung - April 2010	113
A - 4.2. mtg-Datei: Zweite Messung - April 2011	122

10.English Summary _____	133
10.1.Introduction _____	135
10.2.Definitions _____	136
10.2.1.Notation of tree – axes _____	136
10.2.2.Plant topology and mtg files _____	136
10.2.3.Euler angles _____	138
10.3.Description of the used method _____	139
10.3.1.The measurement _____	140
10.3.2.The modeling _____	141
10.3.3.Accuracy, and Errors _____	141
10.3.4.The result _____	141
10.4.Differences to other methods _____	142
10.4.1.Image based methods _____	142
10.4.2.Laserscanning _____	143
10.4.3.Electromagnetic digitizer _____	144
10.5.Modeling and visualization _____	145
10.5.1.VisuAlea _____	145
10.6.The Results _____	146
10.6.1.Three-dimensional plant model _____	147
10.6.2.First steps – definition of the tolerated error and the digitizing resolution _____	150
10.6.3.Comparison: Virtual model – real plant _____	151
10.6.4.Depiction of the diameter in classes _____	152
10.6.5.Development of the plant within one vegetation period _____	153
10.6.6.Differences of the diameters _____	155
10.6.7.Increase of volume _____	156
10.7.Conclusion _____	158

1. Einleitung

„Ingenieurbiologie ist ein Teilgebiet des Bauwesens, das technische, ökologische, gestalterische und ökonomische Ziele verfolgt und zwar vorwiegend durch den Einsatz lebender Baustoffe, also Saatgut, Pflanzenteile und Pflanzengesellschaften.“

(H.M. Schiechl – in ZEH, 2007, S.46)

Durch den Einsatz von Pflanzen als lebende Bauelemente sind ingenieurbiologische Bauwerke von einer hohen Dynamik geprägt. Während zunächst nach der Fertigstellung nicht lebende Materialien (Holz, Stein, Geotextil,...) die Stabilität und Funktion (wie zum Beispiel: Hangstabilisierung, Entwässerung, Sichtschutz,...) der Verbauung unterstützen, übernehmen im Laufe der Zeit vermehrt die verwendeten Pflanzen durch Entwicklung ihrer technisch- biologischen Fähigkeiten, diese Aufgaben (vgl. FLORINETH, 2004, S.36 und 117; SCHLÜTER, 1996, S.15f; ZEH, 2007, S.46).

Darüber hinaus entsteht dadurch ein funktionales Ökosystem, welches sich durch natürliche Sukzessionsvorgänge in einem ständigen Wandel des Aufbaues und der Zusammensetzung der verwendeten Pflanzengesellschaften befindet. Ebenso werden die positiven Auswirkungen dieses Ökosystems auf die abiotischen Umweltfaktoren (Ausgleich der Temperaturverhältnisse, Abschirmung von Strahlung Lärm und Staub) vergrößert und neue Lebensräume geschaffen (vgl. FLORINETH, 2004, S.15ff und 244ff; SCHLÜTER, 1996, S.13ff; ZEH, 2007, S.46).

Für eine dreidimensionale Darstellung und Analyse dieser Dynamik am Computer sind Momentaufnahmen des aktuellen Bewuchses beziehungsweise einzelner Pflanzen der Vegetationsgesellschaft notwendig.

1.1. Problemstellung

Um diese Aufnahmen durchführen zu können, ist es allerdings unbedingt erforderlich, die Pflanzen während der Erhebung nicht zu verletzen, da dies sowohl die Funktionsweise des Bauwerkes als auch die künftigen Messungen beeinträchtigt.

Erste Versuche des Institutes für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau (IBLB) diese nichtinvasiven Aufnahmen durchzuführen wurden bereits im Jahr 2006 im Zuge der Diplomarbeit meines Kollegen Martin PFLEGERL durchgeführt. Mit Hilfe eines Laserscanners wurde versucht ingenieurbiologische Bauelemente zu vermessen und virtuelle, dreidimensionale Abbilder zu erstellen. Hierbei stellte sich heraus, dass diese Methode aufgrund ihrer optischen Komponenten nicht in der Lage war verdeckte Pflanzenteile direkt aufzunehmen. Mehrere Positionierungen rund um die Pflanze waren notwendig, um ein zufriedenstellendes Modell zu erzeugen. Dies bewirkte jedoch eine Zunahme der erhobenen Daten und erforderte eine

zeitintensive Nachbearbeitung, um das Modell erstellen und einfache Abfragen durchführen zu können (vgl. PFLEGERL, 2008).

Es galt eine Methode zu finden, die nicht anfällig auf Okklusion, also der Verdeckung von Teilen der Pflanze durch eigene Äste und Blätter ist, aber auch die Pflanze nicht verletzt. Deshalb wurde ein Gerät benutzt, welches in der Lage ist, mit Hilfe von elektromagnetischen Feldern dreidimensionale Punkte in einem definierten Raum aufzunehmen. Ebenso erfährt es keine Beeinträchtigung durch Okklusion, da es auf keinem optischen Prinzip aufgebaut ist.

1.2.Ziel der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, unter Zuhilfenahme eines elektromagnetischen Digitalisierungsinstrumentes ein virtuelles, dreidimensionales (künftig abgekürzt 3d), geometrisches, oberirdisches Modell einer realen Versuchspflanze zu erstellen. Darüber hinaus soll durch mehrere Aufnahmen zu verschiedenen Zeitpunkten die Entwicklung einer Eberesche (*Sorbus aucuparia*) grafisch dargestellt und rechnerisch ermittelt werden ohne die Pflanze zu beschädigen.

1.3.Herangehensweise

Im Herbst 2009 wurde begonnen, die Funktionsweise und Eigenheiten des verwendeten elektromagnetischen (künftig abgekürzt EM) Digitalisierungsinstrumentes, ein Polhemus Fastrak, kennenzulernen. Um erste Aussagen bezüglich der Datenqualität und der Sensitivität des Systems gegenüber der Messumgebung treffen zu können, fanden Messungen an verschiedenen Orten im Innen- und Außenraum statt. Nach den ersten, nicht zufriedenstellenden Vergleichen der Ergebnisse mit den tatsächlichen Werten wurden Theorien zur Verbesserung der Aufnahmequalitäten erstellt, geprüft und zum Großteil wieder verworfen.

Nach der Erarbeitung und Optimierung der notwendigen Umgebungsparameter und Überprüfungsprozesse folgten im Frühjahr 2010 die ersten Aufnahmen an einer realen Pflanze. Während dieser Zeit waren die Arbeiten von Abstürzen des Aufnahmeprogrammes geprägt. Aufgrund der wachsenden Erfahrung im Umgang mit dem Messinstrument, sowie mit dem Programm, wurden diese jedoch beseitigt und die erste erfolgreiche Aufnahme durchgeführt.

Die Phase des Visualisierens begann. Es stellte sich heraus, dass die in den Fachartikeln beschriebene, theoretisch einfache Bedienung des verwendeten Programmes VisuAlea nicht der Praxis entsprach. Nach zahlreichen Anläufen, die Erstellung eines einfachen Pflanzenmodells zu überschreiten und Berechnungen mit dem digitalen Pflanzenmodell anzustellen, wurde rasch klar, dass sich dieses Programmprojekt einer französischen Forschungsgemeinschaft noch im Entwicklungsstadium befindet.

Durch Ausdauer und Unterstützung meiner Betreuer und der Programmentwickler aus Frankreich gelang es aber laufend neue Ideen zu entwickeln, die zumindest anfangs einfa-

chen Berechnungen und Abfragen in dem Programm weitgehend zu automatisieren und weiterzuentwickeln.

Um Aussagen über die Entwicklung der Versuchspflanze treffen zu können, wurden die Ergebnisse der Messung vom April 2010 mit den Resultaten der Aufnahme vom April 2011 verglichen und die Unterschiede rechnerisch und grafisch mit dem Programm VisuAlea ermittelt.

2. Definitionen

Zum besseren Verständnis des Textes werden im Folgenden einige notwendige Begriffe und ihre Bedeutungen im Zusammenhang mit dieser Arbeit näher erklärt.

2.1. Ordnungsgemäßer Aufbau von Pflanzen

Das Wachstum von Pflanzen findet nicht willkürlich über das ganze Individuum verteilt statt. Vielmehr werden neue Teile der Pflanze durch das Wachstum der Apikalmeristeme quasi auf die bestehenden Pflanzenteile „aufgesetzt“. Dies hat auch die Verbindung sämtlicher Komponenten mit dem Stamm zur Folge und wird im Allgemeinen als Baumstruktur wahrgenommen (vgl. GODIN, CARAGLIO, 1997, S.6).

Analog zu BARTHÈLÈMY und CARAGLIO (2007) werden in dieser Arbeit die Ordnungen der Pflanzenachsen folgendermaßen bezeichnet (vgl. BARTHÈLÈMY, CARAGLIO, 2007, S.382f.):

- Als Achse 1. Ordnung wird der Stamm bezeichnet. Er ist direkt mit dem Boden verbunden und bildet entlang seiner Achse die Ausgangspunkte für Äste 2. Ordnung.
- Achsen oder Äste 2. Ordnung entspringen der Achse 1. Ordnung. Sie verbinden Achsen 3. Ordnung mit dem Stamm.
- Theoretisch können auch Achsen höherer Ordnungen entlang einer Pflanze in Erscheinung treten. Ihre Bezeichnung entwickelt sich analog zu den bestehenden Strukturen (Äste 4. Ordnung, 5. Ordnung usw.) weiter.

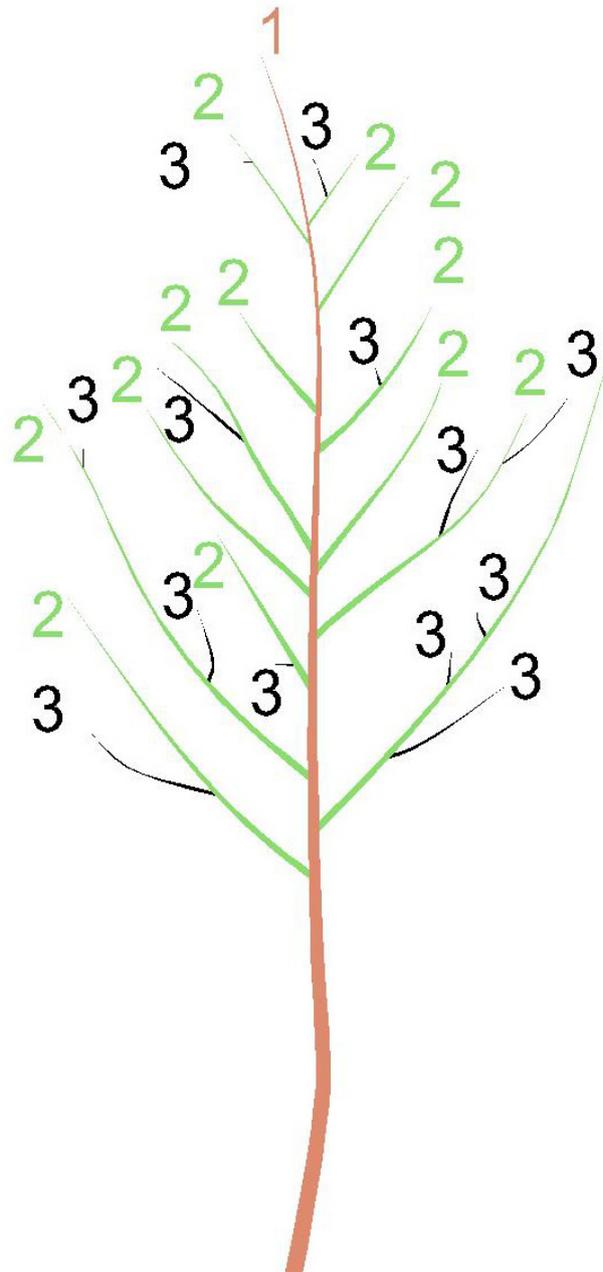


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Astordnungen: braun – Achse 1. Ordnung (Stamm); grün – Achse 2. Ordnung; schwarz – Achse 3. Ordnung

2.2. Topologie einer Pflanze

Das Konzept der topologischen Strukturen basiert darauf, eine Pflanze in einzelne Bestandteile zu zerlegen und die Verbindungen dieser Teile zu beschreiben. Durch wiederholte Aufnahmen der Topologie, zum Beispiel vor und nach einer Vegetationsperiode, wird die Entwicklung der Pflanze durch das Auftreten neuer Strukturen, im Folgenden als Module bezeichnet, festgehalten. Die Daten, welche sich im Laufe der Zeit ansammeln, dienen als Grundlage für virtuell erstellte Wachstumsmodelle der Pflanze und bilden die Basis für das Verstehen des Pflanzenwachstums (vgl. GODIN, CARAGLIO, 1997, S.3f).

Um den Begriff der Topologie einfacher erklären zu können, wird zuallererst der modulare Aufbau durch das Wachstum erläutert.

2.2.1. Modularer Aufbau von Pflanzen

Bei der Betrachtung einer Pflanze fällt auf, dass sie aus mehreren Einheiten besteht, welche an bestimmten Punkten miteinander verbunden sind:

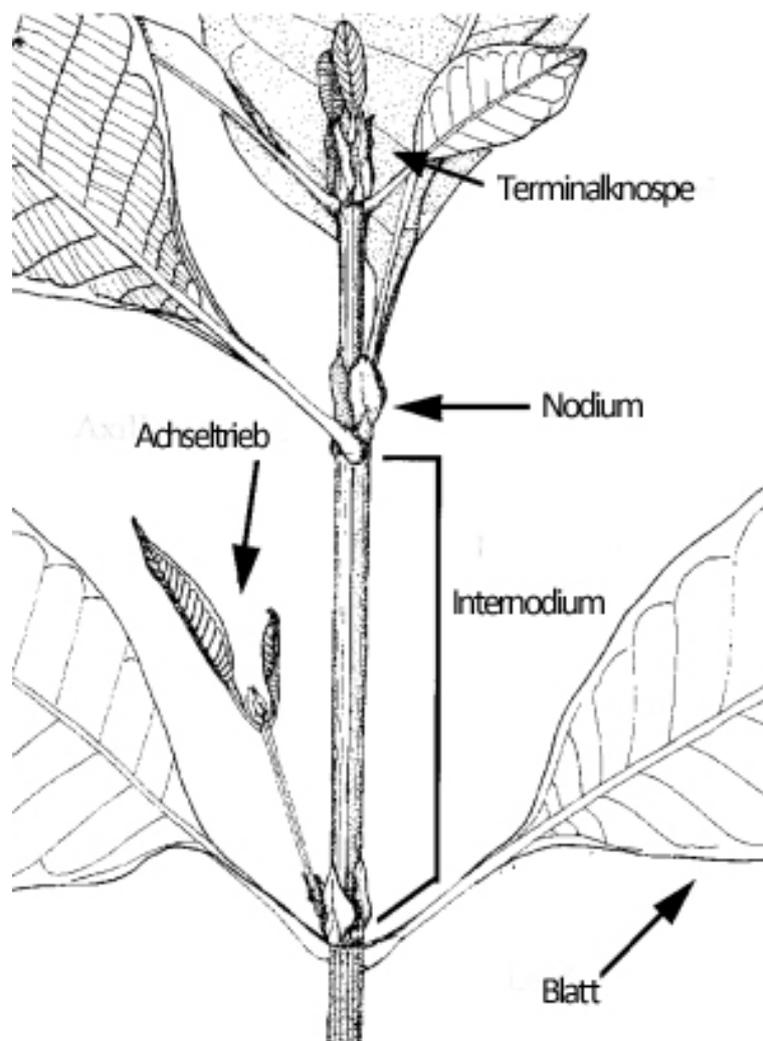


Abbildung 2: Anordnung von Nodien, Internodien, Trieben und Blättern einer Pflanze (verändert nach GODIN, CARAGLIO, 1997, S.4).

- **Stamm** und **Wurzeln** bestehen aus einer Aufeinanderfolge von **Nodien** und **Internodien**, welche unter anderem durch die Teilungsprozesse im Apikalmeristem entstehen. Die Abfolge der erwähnten Nodien und Internodien ist eine **Folgebeziehung** (vgl. GODIN, CARAGLIO, 1997, S.3).
- Entlang des Stammes können durch Lateralmeristeme **Blätter** bzw. **Knospen** und darauffolgend seitliche **Triebe** mit zum Teil eigenen Knospen, Trieben und Blättern entwickelt werden. Die Aufeinanderfolge dieser Elemente wird als **Verästelung** bezeichnet (vgl. GODIN, CARAGLIO, 1997, S.3f).

Durch die bereits erwähnten Wachstumsprozesse in einer Pflanze ist es nun möglich auf zwei so genannte Basis-Modularitäten zu schließen. Es wird unterschieden in:

- **Nodale Modularität:** Die Aufeinanderfolge von Nodien und Internodien entlang eines Stammes.
- **Axiale Modularität:** Das Zusammenhängen von unterschiedlichen Pflanzenachsen, welche durch den Verästelungsprozess entstehen.

Darüber hinaus sind aufgrund klimatischer Einflüsse und/oder genetischer Variationen andere Modularitäten (zum Beispiel gestauchte Achsen) möglich. Diese sollten je nach untersuchtem Individuum festgelegt und berücksichtigt werden, sind jedoch für das Verständnis der Topologie nicht zwingend notwendig (vgl. GODIN, CARAGLIO, 1997, S.4f).

2.2.2. Wachstum von ordnungsgemäßen Strukturen

Wie in Kapitel 2.1 Ordnungsgemäßer Aufbau von Pflanzen bereits beschrieben, werden im Zuge des Wachstums von Pflanzen keine Komponenten inmitten bestehender Strukturen entwickelt. Dies erleichtert den Vergleich mehrerer zeitlich versetzter Topologien einer Pflanze, da die Zuwächse als neue Achsen oder neue Punkte außerhalb der bereits vorhandenen Beschreibung in Erscheinung treten (vgl. GODIN, CARAGLIO, 1997, S.6).

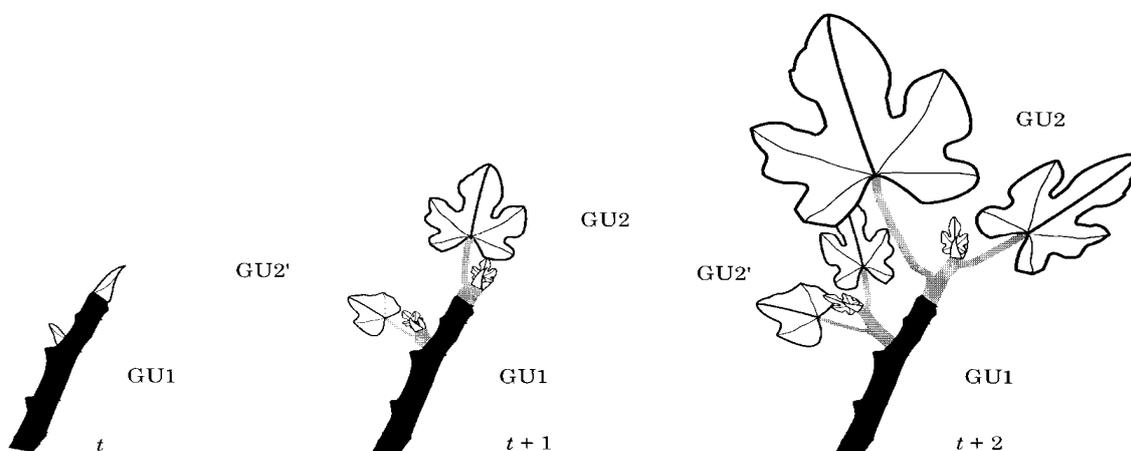


Abbildung 3: Wachstum eines Astes: Bereits bestehende Strukturen werden nicht durch später entwickelte Elemente unterbrochen. GU=Growth unit (Wachstumseinheit); t= Zeitpunkt 0; t+1:1. Folgejahr; t+2: 2. Folgejahr (GODIN, CARAGLIO, 1997, S.8).

2.3. Multiscale Tree Graph (mtg)

In der Regel ist es möglich eine Pflanze in mehreren Maßstabsebenen topologisch zu beschreiben. Je nach Detailierungsgrad steht es dem Betrachter frei die Pflanze als Abfolge von Nodien und Internodien, in ihrer Aststruktur, oder in ihrer Gesamtheit zu analysieren. Um diese Vielschichtigkeit simultan aufnehmen zu können, wurden von GODIN und CARAGLIO die „Multiscale Tree Graphs“ (sinngemäß übersetzt: mehrmaßstäbliche Baumdarstellungen) entwickelt (vgl. GODIN, CARAGLIO, 1997, S.6).

2.3.1. Modulare Abhängigkeiten

Bei einer mehrmaßstäblichen Betrachtungsweise treten verschiedene Typen der relativen Modularitäten-Anordnung auf (vgl. GODIN, CARAGLIO, 1997, S.6ff):

- Die Betrachtung eines größeren Maßstabes stellt eine Verfeinerung der einzelnen Module eines kleineren Maßstabes dar (vgl. Abbildung 4 -a).
- Elemente, welche sich im feineren Maßstab entwickeln, haben nicht zwangsläufig eine Auswirkung auf die Entstehung neuer, übergeordneter Module des größeren Maßstabes (vgl. Abbildung 4 – b und c).
- Ein großmaßstäblicheres Modul (feinerer Betrachtungsmaßstab) ist gleichzeitig Bestandteil von mindestens zwei Modulen, welche mit einem kleineren Maßstab (größerer Betrachtungsmaßstab) analysiert werden (vgl. Abbildung 5).

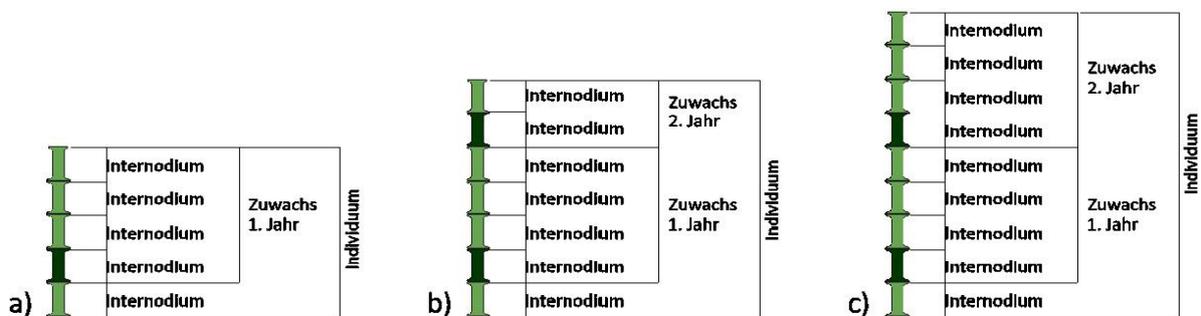


Abbildung 4: Modulare Anordnungen abhängig von der Zeit und dem Betrachtungsmaßstab: a) am Ende einer Vegetationsperiode (1. Jahr); b) im Laufe der Vegetationsperiode (2. Jahr); c) am Ende der Vegetationsperiode (2. Jahr).

Zu Abbildung 4: Die Grafik a) beschreibt den in Internodien unterteilten Gesamtwuchs der aufgenommenen Pflanze am Ende der Vegetationsperiode im Jahre – T. Im darauffolgenden Jahr wurde eine Messung während der laufenden Vegetationsperiode durchgeführt (b). Die neu entstandenen Teile der Pflanze werden dem neu entstandenen Modul „Zuwachs Jahr – T+1“ zugeordnet. Bei einer späteren Betrachtung der Pflanze im selben Jahr (c) ist ein Zuwachs von Internodien in der restlichen Wachstumsperiode des Jahres – T + 1 festzustellen. Trotz des Hinzukommens neuer Elemente in einem größeren Maßstab bleibt die Anzahl der Zuwachsmodule gleich – es ist keine Veränderung der Module im größeren Maßstab erkennbar (vgl. GODIN, CARAGLIO, 1997, S.8).

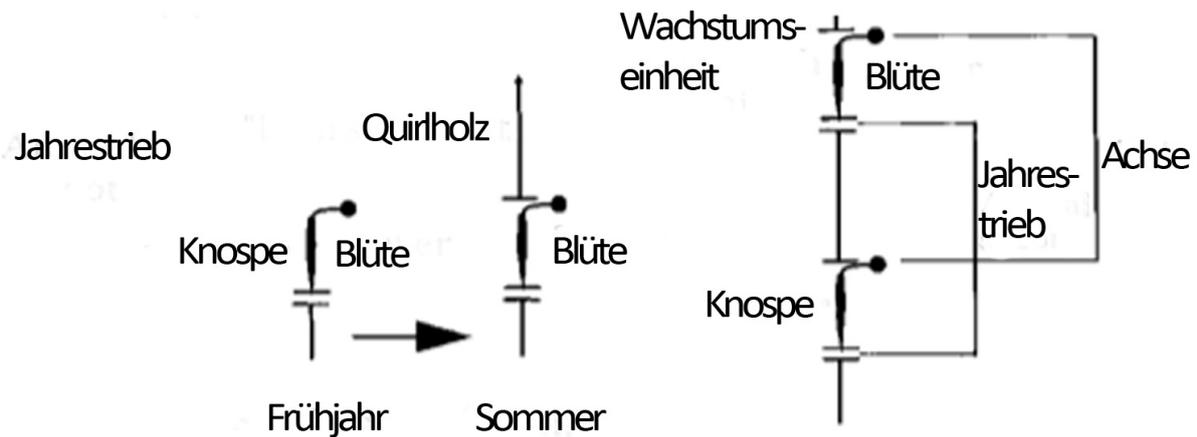


Abbildung 5: Modulüberlappung: Aus einer Knospe bildet sich innerhalb einer Vegetationsperiode eine weitere Achse – der jährliche Zuwachs (Jahrestrieb) ist somit Teil von zwei Achsen. Verändert nach GODIN, CARAGLIO (1997, S.8).

Beispiel zu Abbildung 5: Ein Apfelbaum entwickelt in der ersten Phase der Vegetationsperiode vorerst nur Blüten. Während der zweiten Phase des Wachstums können sich neben der Knospe weitere vegetative Achsen ausbilden. Dadurch ist der jährliche Zuwachs Teil von zwei verschiedenen Achsen (vgl. GODIN, CARAGLIO, 1997, S.8).

Neben den modularen Abhängigkeiten besteht ebenso die Möglichkeit, dass sich aufgrund von natürlichen Entwicklungsprozessen die Module der mehrmaßstäblichen Betrachtung und somit die gesamte Topologie einer Pflanze gravierend verändern. Als Beispiel gilt hierfür das Konkurrenzwachstum zwischen dem Stamm (1. Ordnung) und einem Seitentrieb (2. Ordnung). Angenommen dem Seitentrieb gelingt es durch bessere Versorgung von Licht und anderen Ressourcen im Laufe der Zeit den eigentlichen Stamm höhenmäßig zu überragen und die Rolle des Leittriebs zu übernehmen, so wird aus dem ehemaligen Ast 2. Ordnung eine Achse 1. Ordnung und der einstige Stamm eine Achse 2. Ordnung. Folglich findet auch eine Änderung der Ordnungen der Seitenäste der beiden erwähnten Achsen statt. Dies kann sogar zu einem scheinbaren Verlust von topologischen Elementen führen (vgl. Abbildung 6 und GODIN, CARAGLIO, 1997, S.11).

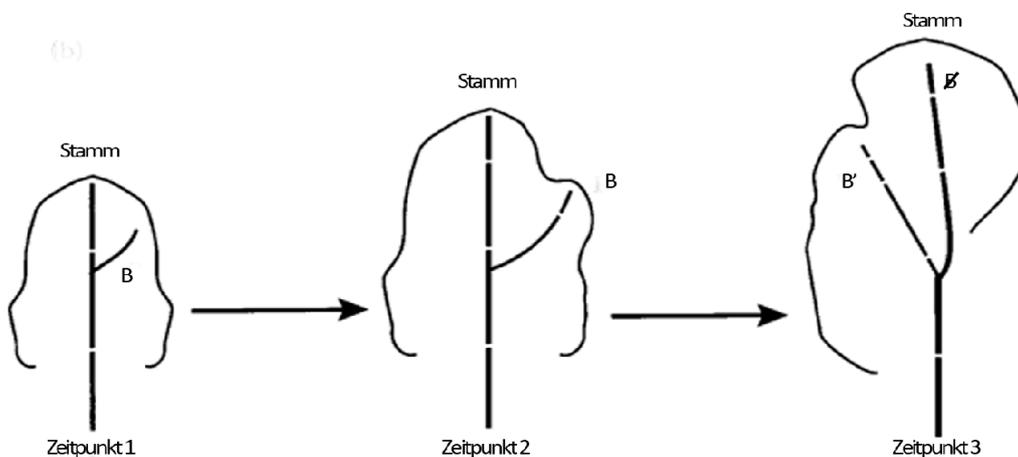


Abbildung 6: Änderung der Topologie durch Konkurrenzwachstum: Während Achse B zu den Zeitpunkten 1 und 2 einen Ast 2. Ordnung darstellt, übernimmt sie zum Zeitpunkt 3 die Rolle des Stammes. Der ehemalige Stamm wird ein Ast 2. Ordnung (B') verändert nach GODIN, CARAGLIO (1997, S.11).

2.3.2. Beschreibung der Topologie – Erstellung eines mtg's

Zur Beschreibung einer Topologie wurde eigens eine Sprache entwickelt, welche die Beziehungen der Module zueinander beschreibt und bei Ausführung des Codes in entsprechenden Programmen eine Modellerstellung reproduzierbar macht. Im Grunde gelten 3 Gesetzmäßigkeiten (vgl. GODIN, COSTES, SINOQUET, 1999, S.344):

- < **Folgebeziehung (nodale Modularität):** $a < b$ beschreibt die Entstehung des Elementes b aus dem Apikalmeristem des Elementes a.
- + **Astbeziehung (axiale Modularität):** $a + b$ beschreibt die Entstehung, des Elementes b aus der Knospe des Elementes a.
- / **Dekompositionssymbol:** Es wird bei maßstabsübergreifenden Beschreibungen verwendet. a/b bedeutet, dass Element b eine Komponente des Elementes a darstellt bzw. das Element a ein sogenannter Komplex des Elementes b ist.
 Beispiel: Mehrere Internodien stellen die Teile eines gesamten Astes dar. Somit ist der Ast (im vorherigen Beispiel bezeichnet als 'a') der Komplex aller Internodien ('b').

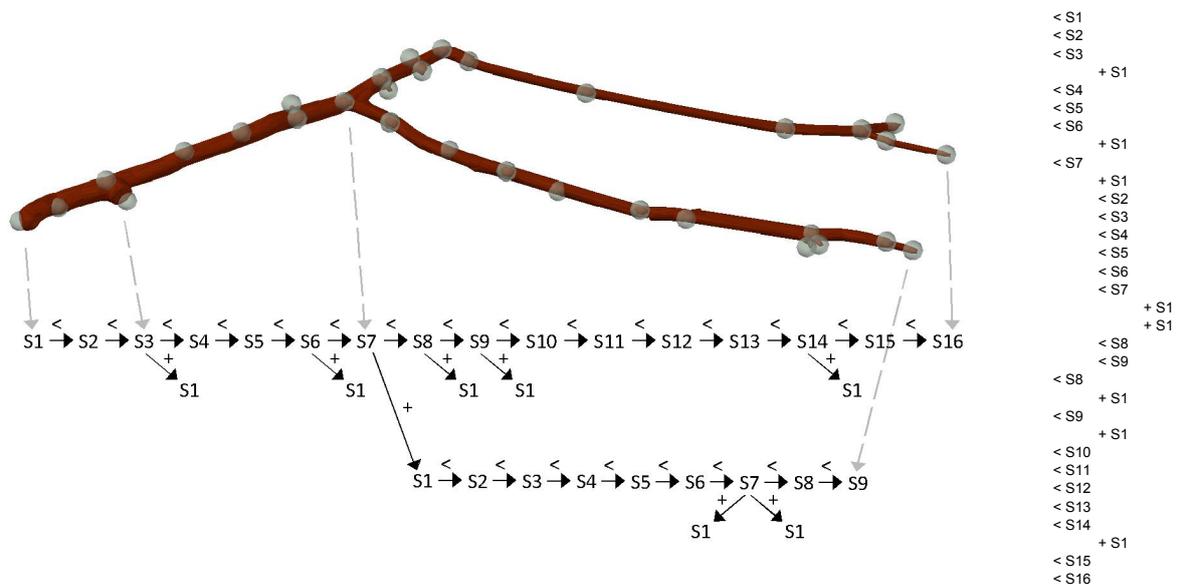


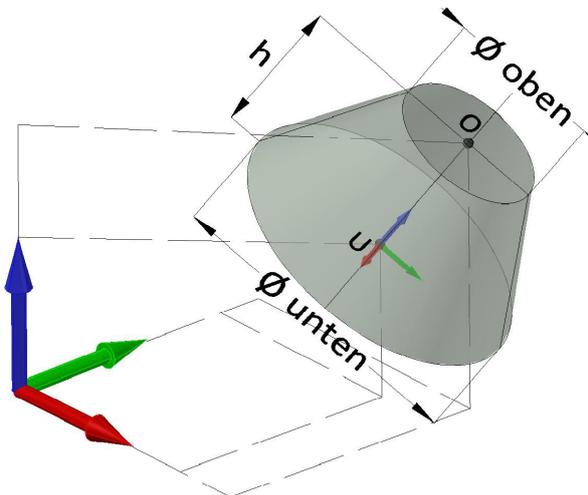
Abbildung 7: Grafische und codierte Darstellung der Topologie eines Astes. Die Messung beginnt an der Basis und endet an der Spitze des Astes. < bezeichnet eine Folgebeziehung; + bezeichnet eine axiale Beziehung (der nächste Messpunkt befindet sich auf einer Achse höherer Ordnung)

Diese Beziehungen können in Tabellenform dargestellt und durch zusätzliche Informationen, wie zum Beispiel 3d-Koordinaten und Durchmesserwerte erweitert werden und dienen somit als Grundlage für geometrische Modelle.

Als Beispiele für vollständige mtg-Beschreibungen befinden sich im Anhang (Kapitel A - 4. Aufschlüsselung der Messergebnisse) die Dateien der im Zuge dieser Arbeit zweimal aufgenommenen Versuchspflanze.

2.4. Geometrisches Modell

Als geometrisches Modell wird die Darstellung einer Pflanze durch geometrisch bekannte Komponenten bezeichnet. Häufig werden hierbei mehrere aufeinanderfolgende Kegelstümpfe verwendet, um eine geometrisch bekannte Annäherung an die tatsächliche Pflanzenform zu erzielen. Die Beschreibung der Lage und der Form der verwendeten Körper findet durch die folgenden Parameter statt (vgl. GODIN, COSTES, SINOQUET, 1999, S.344f):



- 3d-Koordinate der Basis - **U**
- 3d-Koordinate der Spitze - **O**
- Durchmesser an der Basis - **Ø unten**
- Durchmesser an der Spitze - **Ø oben**
- (ev. Höhe des Kegelstumpfes – **h**)

Abbildung 8: Parameter des Kegelstumpfes, sowie deren Lage im Raum.

2.5. Berechnete Computermodelle – L-Systeme

Auch wenn die Ergebnisse der berechneten Computermodelle nicht direkt auf tatsächlichen Pflanzen beruhen, stellen sie den Beginn der digitalen Pflanzenmodellierung und Unterstützung bei Erstellung von gegenwärtigen Pflanzenmodellen dar. Besonders sind hier die Algorithmen der L-Systeme zu erwähnen, welche erstmals im Jahre 1968 von Aristid LINDENMAYER vorgestellt wurden (vgl. PRUSINKIEWICZ et al., 2004, S.v ff).

Sie beruhen auf dem Prinzip immer wiederkehrender Strukturen von Körpern und Flächen unabhängig des Betrachtungsmaßstabs. Diese so genannte „Selbst-Gleichheit“ dient oftmals als Grundlage für die virtuelle Erstellung von Pflanzenteilen, welche während der Aufnahme verdeckt waren (vgl. PRUSINKIEWICZ et al., 2004, S.v ff; MANDELBROT, 1982, S.34; NEUBERT, FRANKEN, DEUSSEN, 2007, S.2; TAN et al., 2007, S.2ff).

Aus einfachen Formalismen, wie der Austausch eines Elementes durch ein Anderes, begann man simple Strukturen des Pflanzenwachstums zu verstehen und zu simulieren. Im Laufe der Zeit wurden grafische Komponenten hinzugefügt und man war in der Lage komplexe, dreidimensionale Formen zu erstellen (vgl. PRUSINKIEWICZ et al., 2004).

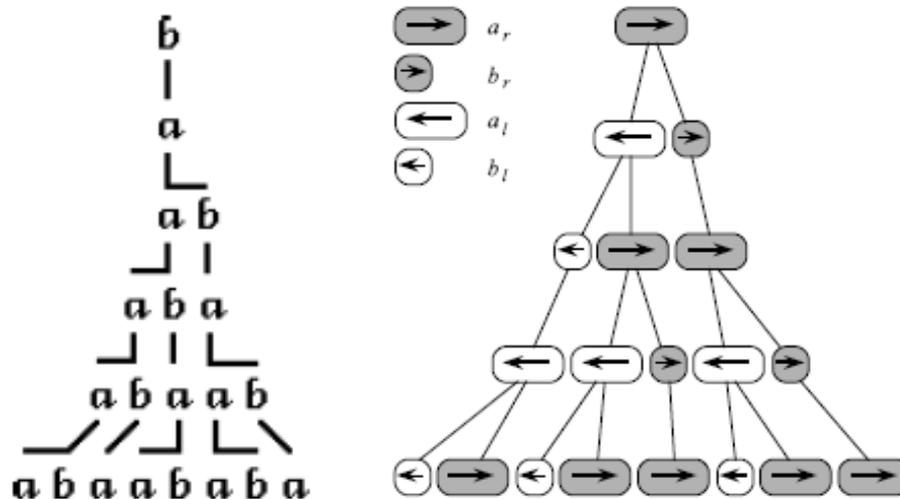


Abbildung 9: Textliche und grafische Darstellung eines L-Systems; rechts: die Weiterentwicklung zweier Elemente 'a' und 'b' – Element 'b' entwickelt sich zu einem Element 'a', während Element 'a' zu 'ab' wird; links: 1d-Darstellung des Wachstums von *Anabaena catenula* nach einem ähnlichen Prinzip (PRUSINKIEWICZ, P. et al, 2004, S.4 und 5)

Eine genauere Beschreibung des Aufbaues der L-Systeme befindet sich im Anhang (vgl. Kapitel A - 1 Details zur Beschreibung der L-Systeme).

2.6. Euler-Winkel

Die Orientierung eines Körpers in einem 3d-Raum wird durch die Euler-Winkel Azimuth (Gier-Winkel), Elevation (Nick-Winkel) und Roll (Roll-Winkel) beschrieben. Die Winkel beziehen sich auf die Drehung zu einer bestimmten Achse in der Null-Lage des Körpers (parallel zum Referenzkoordinatensystem).

Ψ = Azimuth – Beschreibt die Drehung der X- und Y-Achse des Referenzsystems um die Z-Achse. Es entstehen die Achsen X' und Y' (vgl. POLHEMUS, 2005, S.C-5).

θ = Elevation – Beschreibt die Drehung der Z- und X'-Achse um Y'. Es werden die Achsen Z' und X'', welche sich nun parallel zur X-Achse des neuen Koordinatensystems befinden, gebildet (vgl. POLHEMUS, 2005, S.C-5).

ϕ = Roll – Beschreibt die Drehung der Y'- und Z'-Achse um die Achse X''. Es befinden sich nun alle Achsen des Referenzsystems parallel zu den Achsen neuen Koordinatensystems (vgl. POLHEMUS, 2005, S.C-5).

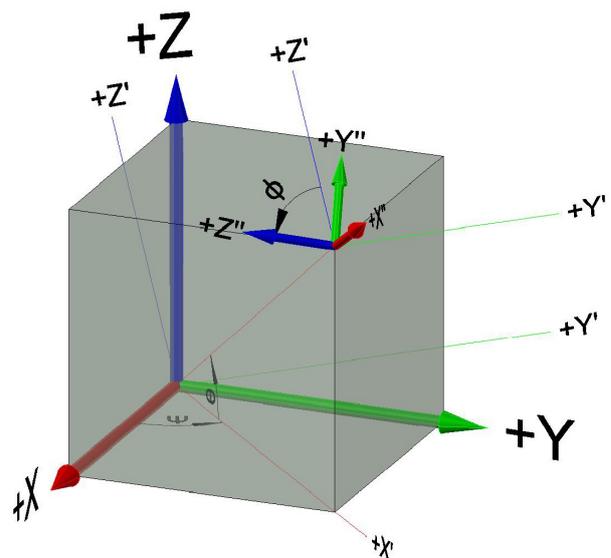


Abbildung 10: Definition der Euler-Winkel

3. Gängige Methoden der Pflanzenaufnahme

Aufgrund der wachsenden Rechenleistung von Computern und auch der Entwicklung der Technik in anderen Bereichen haben sich im Laufe der letzten Jahrzehnte verschiedene Methoden etabliert, um mit verhältnismäßig geringem Aufwand wirklichkeitsnahe Pflanzenmodelle zu erstellen.

Im Allgemeinen wird zwischen drei nichtinvasiven Arten der Aufnahmen unterschieden:

- Aufnahmen mittels Fotografie-basierten Methoden
- Aufnahmen mittels Laser Scanner
- Aufnahmen mittels elektromagnetischem Digitalisierungsinstrument

3.1. Fotografie-basierten Methoden

Fotoapparate besitzen passive optische Sensoren. Sie liefern zweidimensionale Aufnahmen von Farbwerten (vgl. RECHE, MARTIN, DRETTAKIS, 2004, S.722; REMONDINO, 2011, S.1106).

3.1.1. Aufnahme

Mit einer handelsüblichen Digitalkamera wird die Pflanze aus mehreren, unterschiedlichen Blickwinkeln aufgenommen. Die Anzahl der Aufnahmen variiert zwischen den Autoren und Modellierungsverfahren. Während TAN et al. (2007) von notwendigen 10 bis 20 Fotografien in einem Winkel von 120° bis 200° um die Pflanze berichten, benötigen RECHE, MARTIN und DRETTAKIS (2004) für die Modellierung 20 bis 30 Bilder. TENG und CHEN (2009) wiederum berichten von drei Aufnahmen innerhalb eines Winkels von 10°. Jedoch stellen ihre Ergebnisse nur plausible Annäherungen der aufgenommenen Baumfront dar und liefern kein vollständiges dreidimensionales Abbild der Pflanze (vgl. RECHE, MARTIN; DRETTAKIS, 2004, S.722; TAN et al., 2007, S.1f; TENG, CHEN, 2009, S.303f).

Darüber hinaus sollte bei den Aufnahmen auf einen gut differenzierbaren Hintergrund geachtet werden, um die weiteren Modellierungsschritte zu vereinfachen (vgl. RECHE, MARTIN, DRETTAKIS, 2004, S.722).

3.1.2. Modellierung

Die Modellierung des Pflanzenskelettes beinhaltet drei Arbeitsschritte (vgl. TAN et al., 2007, S.2ff; TENG, CHEN, 2009, S.299ff):

- Registrieren der Aufnahmen
- Modellierung der sichtbaren Pflanzenteile
- Modellierung der unsichtbaren Pflanzenteile

Registrieren der Aufnahmen

Da jede Aufnahme ein eigenes Koordinatensystem besitzt, ist es notwendig sämtliche Bilder in ein globales System zu überführen. Dies wird über die Lage von mindestens vier eingemessenen Fixpunkten, welche von jedem Blickwinkel aus betrachtet werden können bewerkstelligt. Dieser Vorgang wird als Registrierung bezeichnet (vgl. NEUBERT, FRANKEN, DEUSSEN, 2007, S.2; TEOBALDELLI et al., 2007, S.1083).

Modellierung der sichtbaren Pflanzenteile

Anschließend an die Registrierung erfolgt die Entfernung überflüssiger Bildfragmente (z.B. der Hintergrund) von den Aufnahmen. Für die eigentliche Modellierung werden die Farb-, Alpha- oder Transparentwerte der Bilder verwendet. Mit Hilfe von Computeralgorithmen werden die sichtbaren Oberflächenpunkte der Pflanze erfasst (vgl. KANG, 2011, S.351; NEUBERT, FRANKEN, DEUSSEN, 2007, S.1; RECHE, MARTIN, DRETTAKIS, 2004, S.721).

An diesem Punkt gibt es Abweichungen zwischen den diversen Methoden:

- Eine Möglichkeit ist die Angleichung und Verbindung von bekannten Volumenkörpern (in der Regel Kegelstümpfe) an die sichtbaren Pflanzenteile (vgl. NEUBERT, FRANKEN, DEUSSEN, 2007, S.4f; TENG, CHEN, 2009, S.299f).
- Andere Verfahren ziehen die bereits ermittelten Oberflächen zur Erstellung des Modelles heran (vgl. RECHE, MARTIN, DRETTAKIS, 2004, S.721; TAN et al., 2007, S.3).

Nach der Durchführung der Modellierung der sichtbaren Pflanze werden die durch Blätter oder andere Äste verdeckten Teile modelliert.

Modellierung der verdeckten Pflanzenteile

Eine Methode zur Erstellung verdeckter Bereiche beinhaltet das Analysieren sichtbarer Strukturen und Ableiten von Wachstumsregeln der verdeckten Äste. Unter Voraussetzung der in Kapitel 2.5 Berechnete Computermodelle – L-Systeme erwähnten „Selbst-Gleichheit“ werden die von der Aufnahme nicht erhobenen Äste dem Modell hinzugefügt (vgl. LIU, J. et al, 2010, S.2f; NEUBERT, FRANKEN, DEUSSEN, 2007, S.2; TAN et al., 2007, S.3ff).

Ein anderer Ansatz betrachtet sowohl die Neigung der durch Okklusion abgeschnittenen Äste als auch deren Abstände zueinander und vervollständigt diese unter der Annahme, dass sich keine geometrischen Anomalien des Astes im verdeckten Teil befinden (vgl. PFEIFER, GORTE, WINTERHALDER, 2004 S.115ff; TENG, CHEN, 2009, S.301ff).

Beide Methoden basieren auf Computeralgorithmen und können vom Benutzer gegebenenfalls adaptiert werden.

3.1.3. Genauigkeit, Auflösung und Fehler

Bezüglich der Genauigkeiten der einzelnen Modelle wurden in der Literatur keine expliziten Werte gefunden. Allerdings kann, durch die Verwendung von fotogrammetrischen Methoden (wie zum Beispiel der Stereobild-Auswertung) angenommen werden, dass Genauigkeiten, abhängig von der Entfernung zur aufgenommenen Pflanze, im Millimeter- bis Zentimeterbereich liegen können (vgl. PFEIFER, GORTE, WINTERHALDER, 2004, S.114; PFLEGERL, 2008, S.57; REMONDINO, 2011, S.1111; TEOBALDELLI et al., 2007, S.1081).

Jedoch wird häufig von einer Annäherung an die reale Pflanze gesprochen, da keine exakte Rekonstruktion von verdeckten Pflanzenteilen möglich ist (vgl. NEUBERT, FRANKEN, DEUSSEN, 2007, S.5; TAN et al., 2007, S.6; TENG, CHEN, 2009, S.303f).

3.1.4. Ergebnis

Die Ergebnisse der Fotografie-basierten Aufnahmemethoden sind je nach Modellierungsmethode verschieden. Sie reichen von einfachen Billboards, also virtuellen Plakatwänden, welche den Baum aus einer Perspektive darstellen, bis hin zu vollständigen, dreidimensionalen Modellen (vgl. NEUBERT, FRANKEN, DEUSSEN, 2007, S.6; RECHE, MARTIN, DRETTAKIS, 2004, S.720ff; TAN et al., 2007, S.1ff).

3.2. Laserscanner

Im Gegensatz zu den Fotoapparaten besitzen Laserscanner aktive Sensoren. Durch das Aussenden und Empfangen von Lichtstrahlen sind sie aufgrund der gemessenen Phasenverschiebung oder der Analyse der Laufzeit in der Lage Entfernungen zu bestimmen. Diese räumlichen Informationen werden in der Regel als verschiedene Grauwerte angezeigt (vgl. PFLEGERL, 2008, S.37; REMONDINO, 2011, S.1106f).

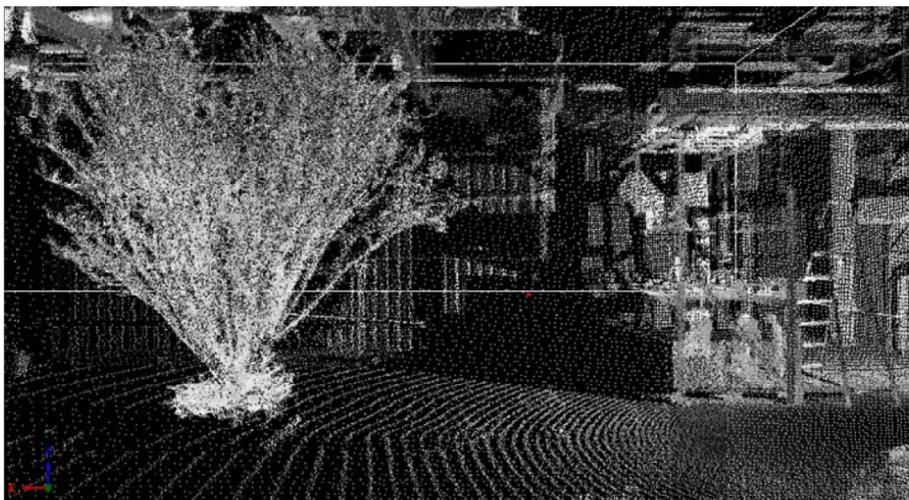


Abbildung 11: Graubild eines Laser Scans: Die verschiedenen Grautöne stehen für Tiefenwerte der Bildpunkte (PFLEGERL, 2008, S. 51).

3.2.1. Aufnahme

Wie bei Fotografie-basierten Methoden sind mehrere Aufnahmen aus unterschiedlichen Richtungen notwendig. Im Durchschnitt gelten 3 bis 5 Aufnahmen aus verschiedenen Blickwinkeln, in einem Abstand von 20 bis 50 Metern zum Objekt, als ausreichend (vgl. CÔTE et al., 2011, S.763; PFLEGERL, 2008, S.38; TEOBALDELLI et al., 2007, S.1085).



Abbildung 12: Lageplan von 7 Aufstellungen mit 7 verschiedenen Koordinatensystemen um das Messobjekt (PFLEGERL, M., 2008, S.44).

Jedoch ist es im günstigsten Fall auch möglich bereits durch eine Aufnahme ein zufriedenstellendes Modell zu erstellen (vgl. XU, GOSSET, CHEN, 2007, S.13).

3.2.2. Modellierung

Um die Pflanzen zu modellieren werden ähnlich wie bei den Fotografie-basierten Methoden die folgenden Schritte durchgeführt (vgl. CÔTE et al., 2011, S.764ff; PFEIFER, GORTE, WINTERHALDER, 2004, S.115ff; TEOBALDELLI et al., 2007, S.1082ff):

- Registrieren der Aufnahmen
- Säubern der Punktwolke
- Modellierung der sichtbaren Pflanzenteile
- Modellierung der verdeckten Pflanzenteile

Registrieren der Aufnahmen

Wie bei fotografischen Aufnahmen werden auch beim Laserscan mehrere Fixpunkte herangezogen, um die Aufnahmen miteinander zu verschneiden (vgl. TEOBALDELLI et al., 2007, S.1083; NEUBERT, FRANKEN, DEUSSEN, 2007, S.2).

Säubern der Punktwolke

Bevor die eigentliche Modellierung beginnt, werden Punkte, welche nicht dem Objekt zuordenbar sind, gelöscht. Darüber hinaus findet eine Verringerung des so genannten Rauschens, also eine Glättung von Punkten auf der Pflanzenoberfläche, statt (vgl. CÔTE et al., 2011, S.764ff; PFEIFER, GORTE, WINTERHALDER, 2004, S.115ff; PFLEGERL, 2008, S.50ff; TEOBALDELLI et al., 2007, S.1083).

Modellierung der sichtbaren Pflanzenteile

Zur Modellierung der sichtbaren Pflanzenteile gibt es mehrere Ansätze, welche sich teilweise überschneiden:

- Mit Hilfe der erhaltenen Oberflächenpunkte werden Dreiecksmaschen erstellt, welche die Hülle der sichtbaren Äste darstellen (vgl. PFLEGERL, 2008, S.53f).
- Der Mittelpunkt von mehreren Bildpunkten einer Ebene wird errechnet. Durch Verbinden der Mittelpunkte werden die einzelnen Achsen der Äste erzeugt. Mit Hilfe von an den Durchmesser angeglichenen Prismen (in der Regel Kegelstümpfe) entlang der ermittelten Achsen entsteht das geometrische Modell (vgl. CÔTE et al., 2011, S.765; PREUKSAKARN et al., 2010, S.15; XU, GOSSET, CHEN, 2007, S.3ff).
- Angleichen von passenden geometrischen Strukturen an die Oberflächenpunkte der Pflanze ohne vorherige Achsenberechnung (vgl. PFEIFER, GORTE, WINTERHALDER, 2004, S.116f; TEOBALDELLI et al., 2007, S.1083).

Modellierung der verdeckten Pflanzenteile

Ein Computerprogramm erkennt alle Teile des Pflanzenskeletts, welche noch nicht mit dem Stamm oder von ihm abgehenden Ästen verbunden sind und gliedert diese Teilstücke unter Berücksichtigung bestimmter Parameter an die bestehenden Strukturen an. Als Parameter dienen zum Beispiel der Abstand zum Stamm/den Ästen, die Neigung der Äste, oder deren Durchmesser. (vgl. PFEIFER, GORTE, WINTERHALDER, 2004, S.116; XU, GOSSET, CHEN, 2007, S.6ff).

3.2.3. Genauigkeit, Auflösung und Fehler

Bei Laserscannern wurden in der Literatur Genauigkeitswerte im Millimeter- bis Zentimeterbereich angegeben, wobei hier der Abstand zum Aufnahmeobjekt, aufgrund der geringer werdenden Punktdichte bei steigender Entfernung, eine wesentliche Rolle spielt (vgl. PFEIFER, GORTE, WINTERHALDER, 2004, S.114; REMONDINO, 2011, S.1104ff; TEOBALDELLI et al., 2007, S.1081).

3.2.4. Ergebnis

Ebenso wie bei den Fotografie-basierten Aufnahmen wird, bezüglich des Ergebnisses von guten Annäherungen an den realen Baum gesprochen (vgl. CÔTE et al., 2009, S.1078; XU, GOSSET, CHEN, 2007, S.13).

PREUKSAKARN et al. (2010) berichten von einer Ähnlichkeit der modellierten Geometrie zu jener der tatsächlichen Pflanze von rund 90%. Aufgrund zur Entfernung zum Sensor und der Okklusion durch Blätter und Nadeln, stellen sich jedoch wesentliche Probleme bei der Modellierung von kleineren Ästen ein (vgl. CÔTE et al., 2011, S.765; PFEIFER, GORTE, WINTERHALDER, 2004, S.119; PREUKSAKARN et al., 2010, S.83).

3.3. Elektromagnetisches Digitalisierungsinstrument

Elektromagnetische Digitalisierungsinstrumente wurden ursprünglich entwickelt, um Bewegungen innerhalb eines künstlich erzeugten elektromagnetischen Feldes (EM-Feldes) aufzuzeichnen und in virtuelle Räume zu übertragen (vgl. KUIPERS, 1975, S.1; KUIPERS, 1977, S.8; RAAB et al., 1979, S.715).

Der tatsächliche technische Hintergrund zur Herstellung und Verwendung von EM-Feldern kann von Hersteller zu Hersteller variieren, jedoch gibt es kaum Unterschiede im generellen Aufbau der Systeme (vgl. NIXON et al., 1998, S.205).

Der Aufbau eines solchen Systems umfasst (vgl. NIXON et al., 1998, S.205; POLHEMUS, 2005, S.10, RAAB et al., 1979, S.709ff):

- einen **EM-Sender** (Transmitter): In ihm befinden sich drei orthogonal zueinander stehende Spulen. Das Aktivieren dieser Spulen erzeugt drei Komponenten (X, Y und Z) eines Magnetfeldes, welches das Referenzkoordinatensystem darstellt. Um Messungen durchführen zu können, muss der Sender während des Messvorganges in einer fixen Position in der Nähe des Aufnahmeobjektes aufgestellt werden. Eine Veränderung der Lage (Umstellen) oder der Orientierung (Verdrehen) während des Messvorganges, würde ohne fixe Referenzpunkte zu einem fehlerhaften Ergebnis führen.
- einen **EM-Empfänger**. In ihm befinden sich drei orthogonal zueinanderstehende Sensoren, welche die Feldstärke des Referenzkoordinatensystems in jedem Punkt innerhalb des vom Transmitter erzeugten EM-Feldes messen.
- eine **Steuerungseinheit**, die benötigt wird um die beiden oben genannten Komponenten mit entsprechenden Stromspannungen zu versorgen. Sie rechnet die gemessenen Feldstärken in 3d-Koordinaten und Euler-Winkel um und übermittelt sie an den Computer.

Da das System nicht von abgedeckten Pflanzenteilen beeinträchtigt wird, ist es in der Lage sämtliche Punkte an der Pflanze direkt aufzunehmen. Jedoch reagiert das Instrument sensibel auf die Messumgebung. Deshalb sollte darauf geachtet werden, fernab von ferromagnetischen Gegenständen und stromführenden Elektrokabeln die Messungen durchzuführen, da störende Magnetfelder Verfälschungen der Ergebnisse zur Folge haben (vgl. POLHEMUS, 2005, S.12; NIXON et al., 1998, S. 205f; RAAB et al., 1979, S.716; SINOQUET, RIVET, GODIN, 1997, S.267).

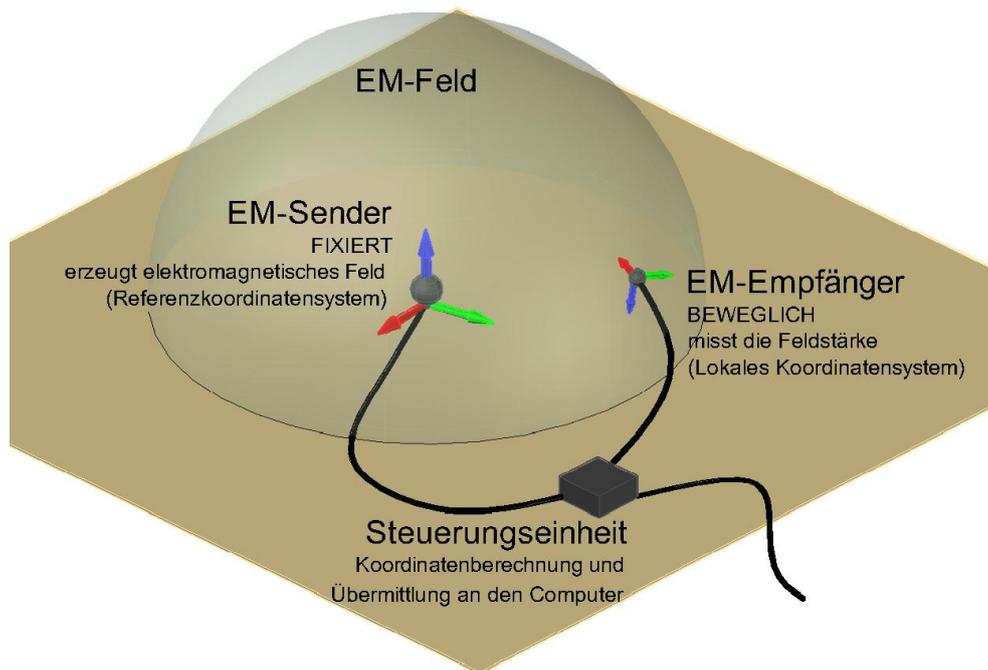


Abbildung 13: Aufnahmeprinzip eines elektromagnetischen (abgekürzt EM) Digitalisierungsinstruments

3.3.1. Aufnahme

Da das Gerät empfindlich auf fremde Magnetfelder in der näheren Messumgebung reagiert, sollten beim Aufbau einige Regeln beachtet werden. Um zuverlässige Ergebnisse zu erhalten empfiehlt es sich darüber hinaus eine Überprüfung der Systemeinstellungen durchzuführen, ehe mit der eigentlichen Messung begonnen wird. Die erwähnten Arbeitsschritte werden in Kapitel 5.1.1 Das elektromagnetische Digitalisierungsinstrument erläutert.

3.3.1.1. Messung

Die Messung findet an der Pflanzenoberfläche statt. Von der Stammbasis ausgehend wird begonnen topologisch markante Punkte der Pflanze mit der Empfängerspitze abzutasten und die entsprechenden Durchmesser zu erheben. Bei Auftreten von Seitenästen (z.B. Äste 2. Ordnung) werden diese ausgehend von ihrem Ursprung bis zu ihrem Endpunkt digitalisiert, ehe die Messung am Stamm fortgesetzt wird (vgl. SINOQUET, RIVET, 1999, S.266).

Das Ergebnis einer Messung ist eine Liste von 3d-Punktkoordinaten sowie der Aststärken entlang der Oberfläche einer Pflanze. Optional ist für eine spätere Umrechnung der Mess-

punkte (vgl. Kapitel 5.4 Nachbearbeitung - Koordinatentransformation) von der Oberfläche auf die tatsächliche Achse, die Ausgabe der entsprechenden Euler-Winkel (Azimuth – Elevation – Roll) möglich. Je nach Computerprogramm, welches zur Aufnahme benutzt wurde, wird die Liste als txt-Datei oder in anderen nativen Formaten abgespeichert.

Eine praktische Anwendung eines Messbeispiels wird in Kapitel 5.3 Pflanzenaufnahme erläutert.

3.3.2. Modellierung

Die aufgenommenen Koordinaten können nun in diverse 3d-Programme geladen werden. Nach dem Verbinden der Punkte zu Achsen, wird durch das Einfügen von Kegelstümpfen unter Verwendung der erhobenen Durchmesser das Modell erstellt.

3.3.3. Genauigkeit, Auflösung und Fehler

Die Auflösung der Messwerte liegt hinsichtlich der Position in einem Bereich von 0,05% des Abstandes zwischen Sender und Empfänger, sowie 0,025° bei der Orientierung (vgl. POLHEMUS, 2005, S.11).

Laut Bedienungsanleitung des Herstellers besitzt das System quadratische Mittelabweichungen von 0,08 cm für die Positionsangaben bzw. 0,15° bei Orientierungsangaben.

Unter kontrollierten Umgebungsbedingungen wurden auch in der Praxis Genauigkeiten von 0,08 mm erzielt. Jedoch berichten THANISAWANYANGKURA et al. (1997) von rund 1 Zentimeter Abweichung aufgrund der Pflanzenbewegungen durch Windeinflüsse bei Erhebungen im freien Gelände (vgl. POLHEMUS, 2005, S.11; SINOQUET et al., 1998, S.204; THANISAWANYANGKURA et al., 1997, S.12).

3.3.3.1.Arten von Messfehlern

Angesichts der Sensibilität von elektromagnetischen Feldern in Bezug auf ihre Umgebung sollte vor jeder Messung eine Evaluierung stattfinden, um die Zuverlässigkeit der Messergebnisse zu gewährleisten. Gegebenenfalls können Kalibrierungen des Systems vorgenommen werden, um die gewünschte Genauigkeit zu erreichen. Den Fehler durch die messende Person außer Acht gelassen, gibt es zwei Arten von Messfehlern (vgl. DAY et al., 1998, S.959; NIXON et al., 1998, S.206f):

- die Genauigkeit von Distanzmessungen in Abhängigkeit zur Sendeeinheit
- die Stabilität der Genauigkeit von Mehrfachmessungen am selben Punkt (Noise)

3.3.3.2.Ursachen der Messfehler

Da die Funktionsweise eines Digitalisierungsinstrumentes an die Erzeugung und Messung von elektromagnetischen Feldern gebunden ist, ist es naheliegend, dass Elemente in der Messumgebung als störend angesehen werden, welche ebenfalls EM-Felder erzeugen.

Als Hauptstörungsquellen gelten ferromagnetische Elemente, wie Eisen, Kobalt und Nickel und stromdurchflossene Kabel (vgl. NIXON et al., 1998, S.206; STRAUSS, 2004, S.40).

Ferromagnetische Gegenstände

Die Oberflächen von ferromagnetischen Stoffen besitzen unterschiedliche Bereiche wechselnder Magnetisierungsrichtungen (Weiß'sche Bezirke). Das Element scheint nach außen hin unmagnetisch. Unter Einwirkung eines externen Magnetfeldes werden jedoch die Weiß'schen Bezirke zunehmend parallel ausgerichtet und das vormals unmagnetische Element erzeugt ein eigenes Magnetfeld (vgl. HILBRANS, BARGEL, SCHULZE, 2008, S.12f; STAMPA, 1999, S.153f).

Verbleibt dieses Element während der gesamten Messung an derselben Position, erzeugt es eine konstante Biegung des Referenzkoordinatensystems, welche zum Beispiel durch eine Kalibrierung ausgeglichen werden kann. Ferromagnetische Gegenstände sind der Hauptgrund für die Verfälschung von Längenmessungen (vgl. HAGEDORN et al. 2007, S.1; KINDRATENKO, 2000, S.3 RAAB et al., 1979, S.716; STAMPA, 1999, S.154).

Elektrische Kabel

Die Anwesenheit von stromdurchflossenen Elektrokabeln drückt sich meist durch ein Springen der Messwerte in ein und denselben Punkt aus. Grund hierfür ist die Tatsache, dass fließender Strom in seiner Umgebung Magnetfelder erzeugt (wie z.B. ein Elektromagnet) und somit Wirbelströme in umliegenden Leitern verursachen kann (vgl. KINDRATENKO, 2000, S.3; RAAB et al., 1979, S.716).

Diverse Artikel behandeln das Thema der Störfaktoren in einem EM-Messumfeld. Besonders hervorgehoben seien hier die Artikel von NIXON et al., 1998 und DAY et al., 1998.

3.3.4. Ergebnis

Aufgrund der nicht vorhandenen Beeinflussung der Aufnahme durch verdeckende Pflanzenteile und der Genauigkeit von rund 1 Zentimeter im Feld, stellen die durch elektromagnetische Instrumente aufgenommenen Modelle eine zuverlässige Kopie realer Pflanzen dar. Aus diesem Grund werden sie auch zur Validierung der durch andere Methoden erstellten Ergebnisse herangezogen (vgl. PREUKSAKARN et al., 2010, S.15).

4. Gegenüberstellung der Aufnahmemethoden

In diesem Abschnitt werden die beschriebenen Aufnahmemethoden miteinander verglichen und ihre Vor- und Nachteile in Hinblick auf die Aufnahme von Pflanzen herausgearbeitet. Zum vereinfachten Vergleich wurde für jedes Kriterium eine Tabelle erstellt, welche die im jeweiligen Abschnitt behandelten Argumente für oder gegen eine Methode anzeigt. Die Bewertung erfolgt im Ampelsystem (rot = negativ; gelb = mäßig; grün = positiv), wobei das Verhältnis immer zu den Methoden untereinander bestimmt wird. Am Ende des Kapitels befindet sich eine Zusammenfassung der Ergebnisse für jede Aufnahmemethode. Die Kriterien lauten wie folgt:

- Größe des aufzunehmenden Objektes
- Auswirkung der Messumgebung auf die Aufnahme
- Benötigte Zeit für Aufbau und Messung und Anzahl der benötigten Personen
- Okklusion von Pflanzenteilen
- Benötigte Zeit für die Modellierung
- Genauigkeit des Pflanzenmodells
- Datenmenge

4.1. Größe des aufzunehmenden Objektes

Aufgrund der begrenzten Reichweite des elektromagnetischen Digitalisierungsinstrumentes sind in dieser Kategorie die Fotografie-basierte Methode und das Laserscanning klar im Vorteil.

Der maximale Operationsradius eines EM-Gerätes liegt laut Herstellerangaben bei maximal 4,6 m. Unter Zuhilfenahme von Referenzpunkten konnte dieser Wert jedoch auf ungefähr 8 Meter ausgeweitet werden (vgl. POLHEMUS, o.J. (b); SINOQUET, RIVET, 1 996, S.265).

Dennoch liegt die Reichweite von elektromagnetischen Digitalisierungsgeräten deutlich unterhalb der Möglichkeiten von fotografischen- und laserbasierten Verfahren, welche in der Lage sind, Pflanzen mit einer Höhe von rund 30 Meter und mehr aufzunehmen

Methode \ Kriterium	Fotografie	Laserscan	Elektromagnetische Felder
Größe des Objektes	~ 30 m	~ 30 m	~ 4 m (bis 8 m)

Tabelle 1: Größe des aufzunehmenden Objektes aufgrund der verschiedenen Aufnahmemethoden

4.2. Auswirkung der Messumgebung auf die Aufnahme

Hier ist zu erwähnen, dass sämtliche Aufnahmemethoden nur bei geeigneten klimatischen Bedingungen durchgeführt werden sollten, da es ansonsten zu Verfälschungen beim daraus resultierenden Modell kommen kann. Insbesondere sind hier jene Methoden im Nachteil, welche zur Aufnahme mehrere Minuten benötigen (Laserscanning, elektromagnetische Felder). Doch auch bei einer fotografischen Erhebung der Pflanze aus mehreren Blickwinkeln kann vor allem Wind zu kurzzeitigen geometrischen Veränderungen der Pflanze führen (Bewegen und Biegen der Äste) und somit ein Überlagern und weiteres Bearbeiten unmöglich machen (vgl. PFEIFER, GORTE, WINTERHALDER, 2004, S.115; XU, GOSSET, CHEN, 2007, S.1).

Ebenso sind Regen und zu niedrige Temperaturen, vor allem bei Verwendung von elektronischen Geräten, bei der Aufnahme hinderlich, da es zu Ungenauigkeiten aufgrund der atmosphärischen Bedingungen kommen kann. Jedoch sei hier erwähnt, dass Laserscanner diese durch Kalibrieren besser auszugleichen vermögen als elektromagnetische Digitalisierungsinstrumente. So ist laut der Bedienungsanleitung des Polhemus Fastrak ein Operationstemperaturfenster von 10° bis 40°C angegeben (PFLEGERL, 2008, S.24; POLHEMUS, 2005, S.12).

Des Weiteren ist unter diesem Punkt die bereits erwähnte Sensibilität von elektromagnetischen Geräten gegenüber metallischen und elektrischen Strom führenden Leitungen zu erwähnen, welche diese Methode besonders anfällig auf Störungsquellen macht.

Im Hinblick auf die Aufnahme von Pflanzen in dicht bewachsenen Gebieten ist wiederum das EM-Instrument im Vorteil, da ein undifferenzierter Hintergrund die Extraktion des Pflanzenskelettes bei optischen Verfahren, insbesondere der Fotografie, erschwert (vgl. RECHE, A., MARTIN, I., DRETTAKIS, G., 2004, S.722).

Aufgrund der Tatsache, dass keine Methode zu hundert Prozent unanfällig gegenüber der Messumgebung ist, werden alle drei Methoden als gleichwertig erachtet. Da aber die Anwesenheit von metallischen und elektrischen Gegenständen nie vollständig ausgeschlossen werden kann und diese enorme Auswirkungen auf das Messergebnis hervorrufen können, wird die Aufnahme durch elektromagnetische Felder schlechter als die beiden anderen Methoden bewertet.

Methode \ Kriterium	Fotografie	Laserscan	Elektromagnetische Felder
Einfluss der Umgebung	mäßig	mäßig	groß

Tabelle 2: Effekt der Messumgebung auf die diversen Aufnahmemethoden

4.3. Benötigte Zeit für Aufbau und Messung / Anzahl der benötigten Personen

Bezüglich der Aufnahmedauer der Fotografie-basierten Methoden schwanken die angegebenen Werte zwischen den verschiedenen Autoren. Während TAN et al. (2007) für 20 bis 30 Aufnahmen rund 10 Minuten benötigten, geben QUAN et al. (2006) die gleiche Zeitspanne für 40 Aufnahmen an. Da hierbei handelsübliche Digitalkameras Verwendung finden, entfällt der Aufbau von Messinstrumenten, sowie die Eingabe und Überprüfung der Messwerte am Computer. Somit kann die Prozedur von einer Person durchgeführt werden (vgl. QUAN et al., 2006, S.603; TAN et al., 2007, S.5).

TEOBALDELLI et al. (2007) sprechen von ungefähr 15 Minuten für eine Messung mittels Laserscanner. Jedoch bezieht sich diese Zeitangabe auf den Scanvorgang in einem Scanpunkt und muss mit der Anzahl der Aufstellungen multipliziert werden (insgesamt rund 60 Minuten bei durchschnittlich vier Messungen). Darüber hinaus werden für jede Neupositionierung des Scanners durch Abbau, Transport, Wiederaufbau und Kalibrierung ca. 30 Minuten berechnet (gesamt rund 120 Minuten). Da der Aufbau und Transport der verwendeten Gerätschaften nur bedingt als Einzelperson möglich, beziehungsweise praktikabel ist, werden für die Pflanzenaufnahme durch Laserscanner zwei Arbeitskräfte veranschlagt (vgl. TEOBALDELLI et al., 2007, S.1082).

Bei einem EM-Instrument werden die benötigte Zeit des Aufbaues und der notwendigen Vorarbeiten aufgrund eigener Erfahrungen mit 15 Minuten festgelegt (vgl. Kapitel 7 Die Ergebnisse). Jedoch kann hier die Aufnahmezeit an der Pflanze stark variieren. Während für eine Jungpflanze mit rund 3 Metern Höhe ungefähr 40 Minuten benötigt werden, berichten SINOQUET, RIVET und GODIN (1997) von einer Aufnahmedauer von bis zu 4 Wochen für einen 20-jährigen Walnussbaum mit einer Höhe von ungefähr 8 Metern und einem Kronendurchmesser von rund 7 Metern. Da in jedem Messpunkt auch der Durchmesser der Pflanze aufgenommen und manuell in das Computerprogramm eingetragen wird, werden hierbei zur Fehlerreduktion zwei Personen benötigt (vgl. SINOQUET, RIVET, GODIN, 1997, S.268).

Methode / Kriterium	Fotografie	Laserscan	Elektromagnetische Felder
Zeit für Aufbau und Messung x Anzahl der Personen	~ 10 min x 1	~ 180 min x 2	~ 1 std (bis 4 Wochen*) x 2
* abhängig von der Größe der aufzunehmenden Pflanze			

Tabelle 3: Benötigte Zeit für Aufbau und Messung x Anzahl der benötigten Personen

4.4. Okklusion von Pflanzenteilen

Da die elektromagnetische Methode nicht durch Äste oder Blätter beeinträchtigt wird, liegt diese Methode gegenüber den optischen Verfahren, welche in sämtlichen Artikeln über eine erschwerte Modellerstellung aufgrund von Okklusion berichten, im Vorteil (vgl. TAN et al., 2007; TEOBALDELLI et al., 2007; XU, GOSSET, CHEN, 2007).

Methode \ Kriterium	Fotografie	Laserscan	Elektromagnetische Felder
Beeinträchtigung durch Okklusion	ja	ja	nein

Tabelle 4: Beeinträchtigung durch Okklusion

4.5. Benötigte Zeit für die Modellierung

Hinsichtlich der Dauer der Nachbearbeitung für Fotografie-basierte Methoden weichen die Werte zwischen den einzelnen Autoren ab. Nach der Aufnahme einer Pflanze berichten TAN et al. (2007) von ca. 10 Minuten Nachbearbeitungszeit bis zur Erstellung des fertigen Modells, während TENG und CHEN (2009) je nach Vorhandensein und Größe der Blätter, zwischen 16 und 120 Minuten benötigen (vgl. TAN et al., 2007, S.5; TENG, CHEN, 2009, S.306).

Ebenso variieren die Werte je nach Modellierungsmethode bei Messungen durch Laser-scanner. Hier werden zwischen 10 Minuten (XU, GOSSET, CHEN, 2007, S.13) und 2 bis 5 Stunden (CÔTE et al., 2009) bis zur Erstellung eine plausiblen Modells benötigt. Bei Konifere-n kann die Modellierung jedoch aufgrund der großen Anzahl an Nadeln auch 31 Stunden erreichen (vgl. CÔTE et al., 2009, S.774).

Die Modellierung der 3d-Punktkoordinaten durch EM-Aufnahmen benötigte bei der im Zuge dieser Diplomarbeit aufgenommenen Jungpflanze ungefähr 5 Minuten. Der Wert für die Modellierung des 20 Jahre alten Walnussbaumes konnte nicht ermittelt werden. Durch die Referenzierung der gemeinsamen Punkte, welche bei einer Umstellung des EM-Senders durchgeführt werden muss, wird jedoch von einer Modellierungszeit von ungefähr 2 Stunden ausgegangen.

Methode \ Kriterium	Fotografie	Laserscan	Elektromagnetische Felder
Zeit für Modellierung	~10 bis 120 min	~10 min bis 31 std	~ 5 min

Tabelle 5: Benötigte Zeit für die Modellierung

4.6. Genauigkeit des Pflanzenmodells

Trotz der möglichen fotogrammetrischen Genauigkeiten wird bei Fotografie-basierten Methoden aufgrund der Okklusion eine Genauigkeit im Zentimeterbereich erreicht (vgl. TEOBALDELLI et al., 2007, S.1081; PFEIFER, GORTE, WINTERHALDER, 2004, S.114).

Ebenso bei Laserscanner liegt die Genauigkeit aufgrund der Okklusion (vgl. CÔTE et al., 2009, S.774) und des Rauschens der Punktwolken (vgl. PFLEGERL, 2008, S.46) trotz der Messungen im Millimeterbereich (TEOBALDELLI et al., 2007, S.1082) bei rund 1 Zentimeter.

Durch die Ungenauigkeit der aufnehmenden Personen aber auch der festgelegten Fehlertoleranz und anderen Faktoren (vgl. Kapitel 3.3.3 Genauigkeit, Auflösung und Fehler) können auch bei einer elektromagnetischen Messung keine exakteren Ergebnisse erzielt werden. Jedoch fungieren Modelle, welche durch ein EM-Digitalisierungsinstrument aufgenommen wurden, als Genauigkeitsreferenz für andere Modelle. Dadurch wird diese Aufnahmemethode besser als die vorhergehenden bewertet (vgl. PREUKSAKARN et al., 2010, S.15).

Methode \ Kriterium	Fotografie	Laserscan	Elektromagnetische Felder
Genauigkeit der Methode	cm- Bereich	cm- Bereich	cm- Bereich

Tabelle 6: Genauigkeitsbereich der Methoden

4.7. Datenmenge

Da fotografische Aufnahmen 3 bis 20 Fotos benötigen (vgl. Kapitel 3.1 Fotografie-basierten Methoden), um zu einem zufriedenstellenden Ergebnis zu gelangen, benötigen sie ein Datenvolumen im zwei- bis dreistelligen Megabyte- Bereich.

Durch die Aufnahme von Millionen/Milliarden Bildpunkten inklusive Tiefeninformationen, sind durch Laserscan erstellte Daten sehr umfangreich. Es kann durchaus vorkommen, dass sich die Datenmenge pro aufgenommene Pflanze im oberen dreistelligen Megabyte- bis hin zum Gigabyte-Bereich befindet (vgl. TEOBALDELLI et al., 2007, S.1081).

Aufgrund der Speicherung der gesamten Topologie samt 3d-Koordinaten und Durchmessern als Textform können Aufnahmen durch EM- Digitizer in Dateien gespeichert werden, deren Größe sich im Kilobyte-Bereich befinden und nur selten Werte über 1 Megabyte erreichen.

Methode \ Kriterium	Fotografie	Laserscan	Elektromagnetische Felder
auf tretende Datenmengen	MB	MB - GB	kB

Tabelle 7: Auftretende Datenmengen

4.8.Zusammenfassung

Methode Kriterium	Fotografie	Laserscan	Elektromagnetische Felder
Größe des Objektes	~ 30 m	~ 30 m	~ 4 m (bis 8 m)
Einfluss der Umgebung	mäßig	mäßig	groß
Zeit für Aufbau und Messung x Anzahl der Personen	~ 10 min x 1	~ 180 min x 2	~ 1 std (bis 4 Wochen*) x 2
Beeinträchtigung durch Okklusion	ja	ja	nein
Zeit für Modellierung	~10 bis 120 min	~10 min bis 31 std	~ 5 min
Genauigkeit der Methode	cm- Bereich	cm- Bereich	cm- Bereich
aufretende Datenmengen	MB	MB - GB	kB
* abhängig von der Größe der aufzunehmenden Pflanze			

Tabelle 8: Gegenüberstellung sämtlicher Methoden anhand der angeführten Kategorien

Fotografie

Diese Methode hat ihre Stärken in der relativ schnellen Aufnahme- und Modellierungsdauer, insbesondere in Hinblick auf die Objektgröße.

Auch in Puncto Genauigkeit, Datenmenge und Sensibilität auf die Messumgebung können keine nachteiligen Aspekte ausgemacht werden.

Jedoch führt die Okklusion durch Blätter oder andere Pflanzenteile zur Erstellung eines zum Teil ungenauen Modells.

Laserscanning

Die Möglichkeit mit einer geringen Anzahl an Messungen relativ große Pflanzen aufnehmen zu können, ist ein Vorteil dieser Methode.

Die erreichte Aufnahmegenaugigkeit, die benötigten Zeiten für Aufbau, Messung und Modellierung und auch die Auswirkung der Messumgebung auf diese Methode liegen im durchschnittlichen Bereich.

Gegen diese Aufnahmemethode sprechen die auftretenden Datenmengen und die Unfähigkeit verdeckte Pflanzenteile aufnehmen zu können.

Elektromagnetisches Digitalisierungsinstrument

Der Vorteil dieser Methode liegt in der möglichen Exaktheit und der Immunität gegenüber Okklusion von Pflanzenteilen während der Aufnahme. Ebenso kann der Zeitaufwand, der für die Modellierung benötigt wird, als gering betrachtet werden.

Als negativ anzuführen ist die geringe Reichweite, da nach aktuellem Stand der Technik nur innerhalb eines 4 Meter-Radius operiert werden kann. Zwar kann dieser Radius theoretisch durch Einmessen von Referenzpunkten beliebig erweitert werden, jedoch ist dies mit einem enorm steigenden Zeitaufwand für die ohnehin nur durchschnittliche Aufbau- und Messdauer verbunden.

Darüber hinaus sollte man beachten, dass zur Abtastung höher gelegener Punkte keine metallischen Gerüste verwendet werden dürfen. Ebenso ist die mangelnde Wettertauglichkeit aufgrund der elektronischen Bauteile zu berücksichtigen (vgl. SINOQUET, RIVET, 1996, S.269f).

5. Die Pflanzendigitalisierung

Im Zuge dieser Arbeit werden unter dem Begriff Pflanzendigitalisierung sämtliche Vorgänge verstanden, die notwendig sind, um lagerichtige 3d-Koordinaten einer Pflanze bzw. von Pflanzenteilen zu erhalten. Zu den Arbeitsschritten zählen neben der eigentlichen Aufnahme auch der Aufbau des Messinstrumentes sowie die Nachbearbeitung der Messpunkte.

5.1. Beschreibung der verwendeten Komponenten

Neben einem handelsüblichen Computer und einer Schiebelehre aus Kunststoff wurde folgendes Zubehör zur Pflanzenaufnahme benötigt:

- Ein elektromagnetisches Digitalisierungsinstrument
(Markenbezeichnung: Polhemus Fastrak)
- Ein Digitalisierungsprogramm (PlafDigit)
- Eine Versuchspflanze (Eberesche – *Sorbus aucuparia*)

Die Kapitel 5.1.1 bis 5.1.3 beinhalten Beschreibungen der einzelnen Komponenten.

5.1.1. Das elektromagnetische Digitalisierungsinstrument (Polhemus Fastrak)

Der Polhemus Fastrak besteht aus drei Hauptbestandteilen:

- Der Long-Ranger / Short Ranger (EM-Sender)
- Der Stylus (EM-Empfänger)
- Die System Electronic Unit –SEU (Steuerungseinheit)

Der Long-Ranger (EM-Sender)

Der Long-Ranger erzeugt das aus drei Teilfeldern bestehende elektromagnetische Feld und dient als Referenz der Lage und der Orientierung für den Empfänger (vgl. POLHEMUS, 2005, S.18).

Das von ihm produzierte EM-Feld ermöglicht Messungen bis zu einem Abstand von rund 4,6 Metern (vgl. POLHEMUS, o.J. (b)). Des Weiteren ist das Signal/Noise-Verhältnis, also das Rauschen der Werte in einem Punkt, aufgrund des stärkeren Feldes besser für Bewegungsmessungen geeignet als beim Short Ranger (POLHEMUS, 2005, S.21f).



Abbildung 14: Fastrak Long-Ranger.

Der Short-Ranger



Abbildung 15: Fastrak Short-Ranger.

Er induziert ein EM-Feld mit einem Radius von ungefähr 1,5 Metern und ist daher nur für kleinere Aufnahmeobjekte geeignet. Jedoch bieten eine größere Störungstoleranz gegenüber Umweltfaktoren (metallische Gegenstände in unmittelbarer Umgebung) und die geringere Fehleranfälligkeit, wenn Sender und Empfänger sich einander zu nahe kommen, gewisse Vorteile gegenüber dem Long-Ranger (vgl. POLHEMUS, 2008, S.1 bzw. POLHEMUS, o.J. (b) und POLHEMUS, 2005, S.22).

Der Stylus – (EM-Empfänger)



Abbildung 16: Fastrak Stylus

Der als Stift geformte Empfänger stellt den beweglichen Teil des Systems dar. Im vorderen Teil des Stylus befinden sich drei Spulen, welche den Ursprung des beweglichen Koordinatensystems darstellen (vgl. POLHEMUS, 2005, S.E-2).

Aufgrund der Lage der Spulen zu den empfangenen Feldvektoren des Senders können die Lage sowie die Orientierung des Stylus im 3d-Raum ermittelt werden (vgl. POLHEMUS, 2005, S.10 und 20).

Theoretisch ist eine simultane Messung mit bis zu vier Empfängern möglich, wobei die Wiederholungsrate (gemessen in Hz) der Messungen reduziert wird (vgl. POLHEMUS, 2005, S.10, 11 und 89):

- bei 1 Empfänger sind Aufnahmen mit 120Hz möglich
- bei 2 Empfängern mit 60Hz
- bei 3 Empfängern mit 40Hz
- bei 4 Empfängern mit 30Hz

Die System Electronic Unit – SEU (Steuerungseinheit)



Abbildung 17: Fastrak SEU.

Sie ist das „Gehirn“ des gesamten Systems. Die SEU ist sowohl mit dem Sender als auch mit bis zu vier Empfängern und einem PC verbunden. In ihr werden die gemessenen Vektoren in 3d-Koordinaten und die dazugehörigen Euler-Winkel umgewandelt und an den Computer gesendet (vgl. POLHEMUS, 2005, S.13).

5.1.1.1. Aufbau des Polhemus Fastrak

Beim Aufbau sollen folgende Grundregeln beachtet werden:

- Der Aufnahmebereich muss möglichst frei von störenden Umwelteinflüssen sein (Faustregel: der Abstand zum nächsten metallischen Objekt soll mindestens dreimal den Abstand zwischen Sender und Empfänger betragen (vgl. POLHEMUS, o.J. (a)). Ebenso sollen der zur Messung benötigte Computer und die Steuerungseinheit einen größtmöglichen Abstand zu den elektromagnetischen Komponenten besitzen.
- Stabile gegen Kippen und Drehen gesicherte Positionierung der Sende-Einheit in einem geeigneten Abstand zum Messobjekt (basierend auf dem Ergebnis der Genauigkeitsmessungen – vgl. Kapitel 5.1.1.2 Tests und Konfigurationen). Des Weiteren sollte darauf geachtet werden, dass alle nötigen Messpunkte innerhalb des Operationsradius liegen.
- Die Kabel der Sende- und Empfänger-Einheit sollen sich nach Möglichkeit während der ganzen Aufnahme nicht überkreuzen, da es ansonsten zu Wirbelströmen und anderen Beeinflussungen des Systems kommen kann (vgl. NIXON et al., S.210; POLHEMUS, 2005, S.13).

5.1.1.2. Tests und Konfigurationen

Um effizient arbeiten zu können und vertrauenswürdige Ergebnisse zu erhalten, empfiehlt es sich vor der eigentlichen Aufnahme einige Tests durchzuführen. Falls manche Überprüfungen geringe Unstimmigkeiten oder Fehler aufweisen, können Einstellungen am Gerät über die grafische Benutzeroberfläche (engl. Graphical User Interface - GUI) des Polhemus-Systemprogrammes vorgenommen werden.

Eine genaue Beschreibung der gängigen Einstellungsparameter befindet sich im Anhang (Kapitel A - 2 Spezielle Details zu den Fastrak Konfigurationen).

Überprüfung der Mess-Hemisphäre

Aufgrund der Symmetrie von elektromagnetischen Feldern gibt es für jede Messung zwei mögliche mathematische Lösungen und somit zwei mögliche Positionen des Empfängers. Deshalb kann die Messung nur innerhalb einer Hälfte des theoretisch kugelförmigen EM-Feldes durchgeführt werden. (vgl. POLHEMUS, 2005, S.47f und C-3)

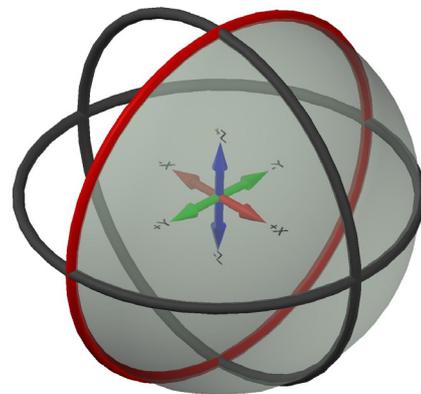


Abbildung 18: Darstellung der Mess-Hemisphäre

Für eine Überprüfung dieser sogenannten Messhalbkugel (oder Messhemisphäre) ist es ratsam, eine grobe Aufnahme der „Eckpunkte“ des aufzunehmenden Objektes vorzunehmen und die gemessenen Koordinaten im Polhemus- Systemprogramm zu überprüfen. Eine etwaige Überschreitung der Hemisphäre während der Messung (Abbildung 19) verursacht ein Umspringen der Vorzeichen von zwei der drei ausgegebenen Koordinaten (vgl. POLHEMUS, 2005, S.47f).

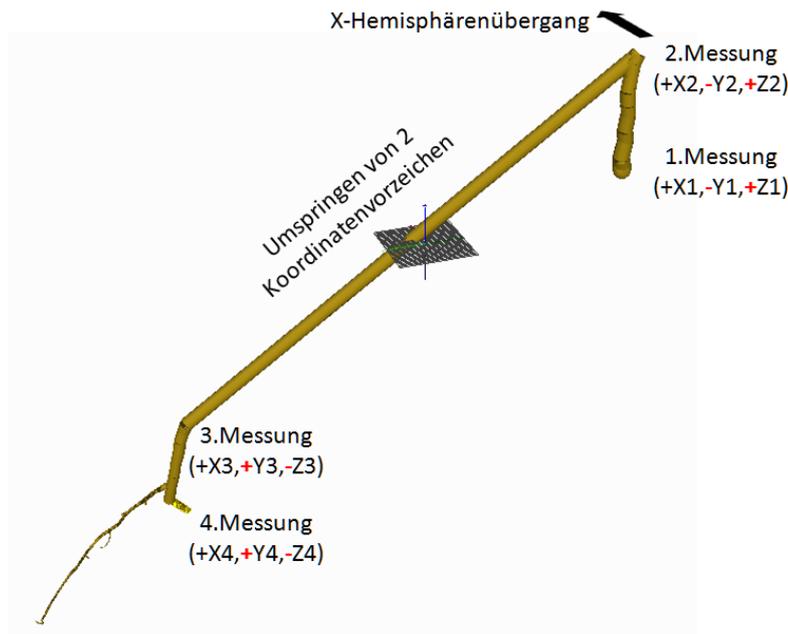


Abbildung 19: Ergebnis einer Überschreitung der Messhemisphäre: Zwischen der zweiten und dritten Messung wird die eingestellte X-Hemisphäre überschritten und bewirkt ein Umspringen der Vorzeichen der Y- und Z- Koordinaten.

In diesem Fall kann eine Einstellung der Messhalbkugel über das GUI (Graphical User Interface), oder ein Drehen des Transmitters das Problem beseitigen.

Hinweis: Falls sich während der Überprüfung nur eine der X-, Y- oder Z- Koordinaten in ihrem Vorzeichen verändert, bedeutet dies lediglich, dass die entsprechende Achse, jedoch nicht die Messhalbkugel überschritten wurde. Dies stellt während des Messens keinen Fehler dar.

Messabstand zur Empfänger-Spitze überprüfen

Eine Einstellung des Messabstandes zur Empfängerspitze, also dem Abstand zwischen den drei Empfängerspulen und der Spitze des Stylus, muss in der Regel nicht durchgeführt werden. Jedoch empfiehlt es sich vor dem Messvorgang eine Überprüfung der Abstandswerte im Systemprogramm durchzuführen (vgl. POLHEMUS, 2005, S.10 und 53).

Folgende Werte definieren die Empfängerspitze: **X: 6,438, Y: 0,037, Z: 0,057**. Gegebenenfalls kann eine Mehrfachmessung eines bestimmten Punktes aus verschiedenen Richtungen mit Überprüfung der ausgegebenen Koordinaten durchgeführt werden (vgl. Abbildung 20).

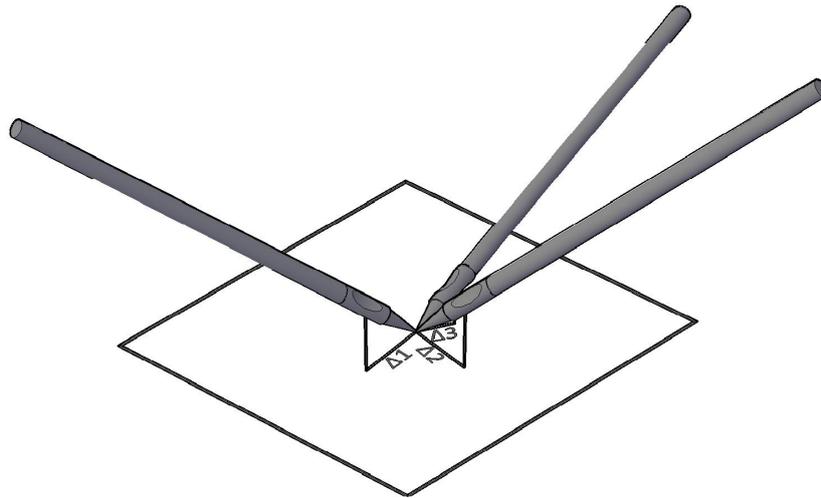


Abbildung 20: Eine Mehrfachmessung desselben Punktes aus unterschiedlichen Richtungen kann eine Abweichung in den Abstandswerten zur Messspitze anzeigen

Überprüfen auf Systemfehler

Dies kann bereits während der Überprüfung der Mess-Hemisphäre stattfinden. Hier ist lediglich zu überprüfen, ob die gemessenen Punkte einen BIT-Code ausgeben oder nicht. BIT steht für „Build-In-Test“ und bedeutet „systeminterne Überprüfung“. Wenn kein Fehler vorliegt, wird kein Code angezeigt (vgl. POLHEMUS, 2005, S.C-2).

Wird der BIT-Code 'k' vom System ausgegeben, ist der Abstand zwischen dem Transmitter und dem Aufnahmeobjekt zu verringern (vgl. POLHEMUS, 2005, S.70).

Falls ein anderer BIT-Code ausgegeben wird, sollte im Anhang (A - 2 Spezielle Details zu den Fastrak Konfigurationen) oder der Polhemus Bedienungsanleitung (POLHEMUS, 2005, S.69f) überprüft werden, um welchen Fehler es sich handelt.

Evaluierung der Erhebungsumgebung

Wie bereits in Kapitel 3.3.3 Genauigkeit, Auflösung und Fehler erwähnt wurde, kann ein in der Nähe unterirdisch verlegtes Stromkabel oder Metallstück das elektromagnetische Feld beeinflussen und somit eine fehlerhafte Messung verursachen.

Im Grunde wird zwischen statischen und dynamischen Fehlern unterschieden. Als dynamische Fehler werden solche bezeichnet, die sich im Laufe der Zeit verändern. Sie werden Rauschen oder Noise genannt. Der Grund hierfür liegt hauptsächlich im Auftreten von fremden elektromagnetischen Feldern, wie sie zum Beispiel durch Elektrokabel erzeugt werden (vgl. KINDRATENKO, 2000, S.3; NIXON et al., 1998, S.206f).

Statische Fehler hingegen bewirken eine konstante Abweichung des Messergebnisses zum realen Wert. Sie treten hauptsächlich auf, wenn sich metallische Gegenstände in der Umgebung befinden (vgl. KINDRATENKO, 2000, S.3, NIXON et al., 1998, S.210ff).

DAY, MURDOCH und DUMAS (2000) testeten die Zuverlässigkeit von elektromagnetischen Messinstrumenten durch Mehrfachmessungen in definierten Punkten. Durch etwaige Schwankungen der Ergebnisse in einem Punkt, sowie die Abweichung der Länge zwischen zwei bekannten Punkten konnte der Fehler des Systems in Hinblick auf die Messumgebung festgestellt werden (vgl. DAY, MURDOCH, DUMAS, 2000, S.1039ff).

Ähnliche Methoden der statischen und dynamischen Fehlererhebung wurden auch durch BRYSON (1992) und NIXON et al. (1998) durchgeführt. Aufbauend auf diese Ideen wurden die folgenden, im Feld einfach anzuwendenden, Evaluierungsmethoden entwickelt.

Die Genauigkeit von Messungen am selben Punkt (Dynamischer Fehler -Rauschen)

Hierfür reicht es, den Stylus in bestimmten Abständen zum Sender zu fixieren und mittels des Polhemus Systemprogramms mehrere Male eine Messung am selben Punkt vorzunehmen. Im Idealfall sollten alle Messungen die gleichen Koordinaten aufweisen ($\pm 0,01$ cm – abhängig vom Abstand zwischen dem Sender und dem Empfänger). Falls eine Störung in der Umgebung vorhanden ist und die gemessenen Koordinaten nicht übereinstimmen, sollte versucht werden das störende Element zu beseitigen oder einen anderen Platz für Messungen zu finden.

Um eine statistische Auswertung der Messumgebung durchführen zu können, wurde ein Excel-Arbeitsblatt erstellt, welches automatisch die Abweichungen jeder Messung zu dem gemessenen Durchschnittswert berechnet und bei Überschreitung eines festgelegten Grenzwertes markiert.

Die Genauigkeit von Distanzmessungen (statischer Fehler)/ maximale Reichweite

Zur Überprüfung der geometrischen Genauigkeit des Systems wird ein nicht metallisches Maßband benötigt. Nachdem das Maßband radial zum Transmitter ausgelegt worden ist, wird in genau definierten, zunehmenden Abständen (z.B. alle 5 cm) zum Transmitter ein Punkt aufgenommen bis das Systemprogramm einen Messfehler aufgrund eines zu großen Abstandes (BIT-Code 'k') ausgibt.

Mit dieser Methode können zeitgleich zwei Überprüfungen gemacht werden: Erstens kann durch Berechnen aller gemessenen Koordinaten zueinander und deren Vergleich mit den tatsächlichen Abständen eine Aussage über die Exaktheit in jedem Punkt getroffen werden. Zweitens ist auch eine Erhebung der tatsächlichen Reichweite möglich.

Auch hierfür wurde ein Excel-Arbeitsblatt angelegt, welches durch Einfügen der Messwerte, Definition der Messabstände und Festlegen von zulässigen Höchstabweichungen bezogen auf die realen Abstände eine Evaluierung zulässt. Die Strecken zwischen den gemessenen Punkten werden berechnet und mit den tatsächlichen Abständen verglichen.

Als optische Hilfestellung der Evaluierung dienen zwei automatisch erstellte Grafiken:

Die erste Abbildung (Abbildung 21) zeigt alle berechneten Abweichungen der Längen zwischen jedem Punkt in Tabellenform. Als Unterstützung werden jene Abweichungen, die zuvor definierte Toleranzwerte überschreiten gelb oder rot eingefärbt.

Die zweite Grafik (Abbildung 22) stellt die Abweichung mit zunehmendem Abstand zum Transmitter als Liniendiagramm dar. Die beiden Linien markieren ebenso, wie in der ersten Grafik, die zuvor definierten Toleranzwerte.

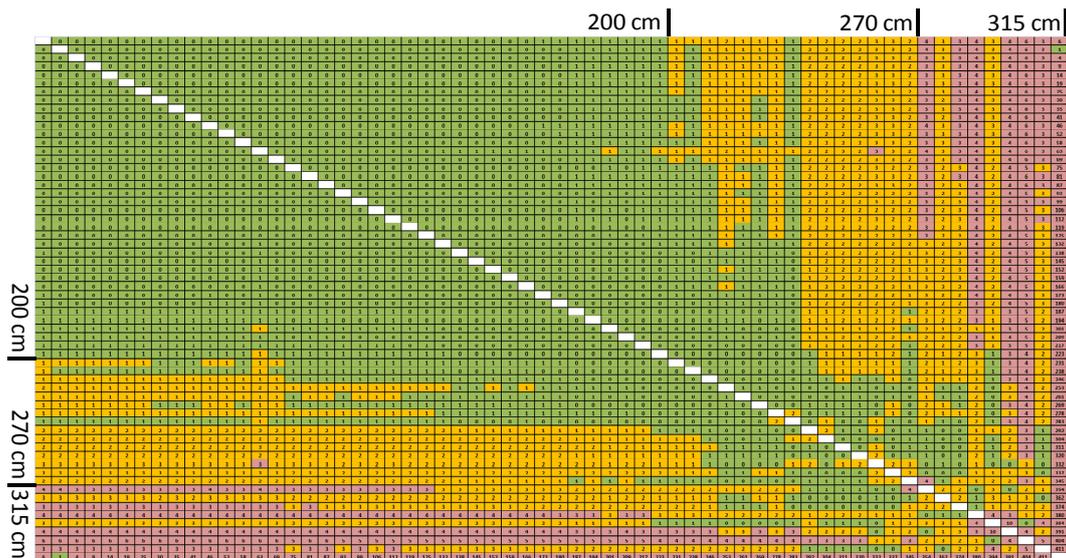


Abbildung 21: Grafisches Ergebnis der Umgebungsevaluierung

Zu Abbildung 21: Der maximale Messabstand betrug 315 cm. Alle Messungen unter 200 cm liegen innerhalb einer Genauigkeit von 1 cm (grün), zwischen 200 und 270 innerhalb von 1-3 cm (gelb) und über 270 cm über 3 cm (rot), wie auch dem folgendem Grafen entnommen werden kann.

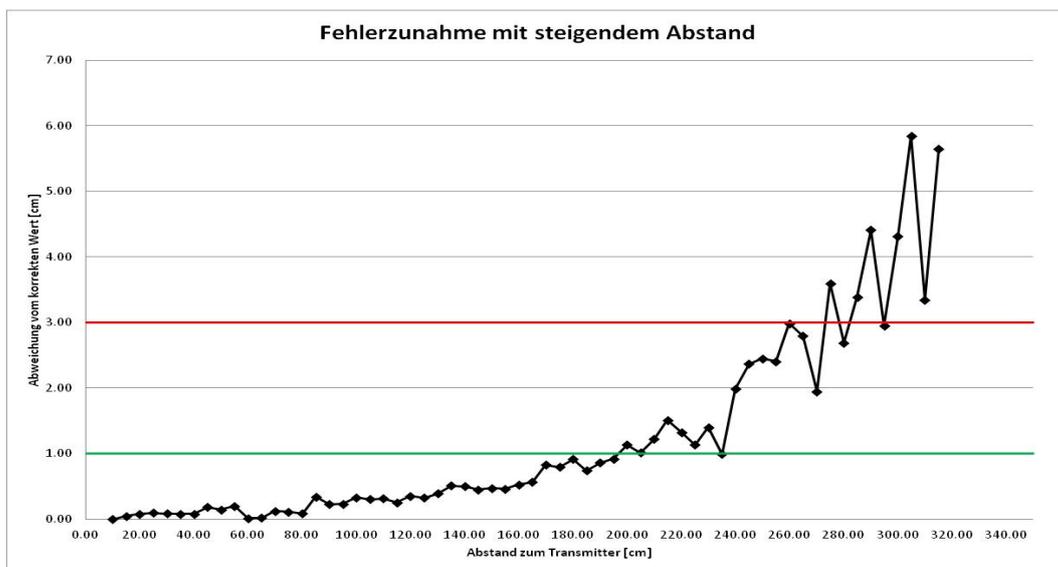


Abbildung 22: Abweichung der Messergebnisse mit steigendem Abstand zum Senderursprung (Angaben in cm)

5.1.2. Das Digitalisierungsprogramm (PiafDigit)

Für unsere Aufnahmen benutzen wir PiafDigit, ein von der U.M.R. PIAF INRA- UBP¹ speziell entwickeltes Programm zur Aufnahme von Pflanzen durch einen Polhemus Fastrak (vgl. DANJON, REUBENS, 2007, S.10; DONÈS, ADAM, SINOQUET, 2006, S.15ff).

Die Vorteile des Programmes liegen darin, dass der Anwender dieser Software gegebenenfalls nötige Einstellungen am elektromagnetischen Instrument direkt über die Benutzeroberfläche vornehmen kann. Des Weiteren können neben der halb-automatischen Erstellung der Topologie die während der Aufnahme gemessenen Astdurchmesser gleich direkt eingetragen und direkt den Messpunkten zugeordnet werden. Für eine erste optische Analyse des Messergebnisses stellt das Programm die aufgenommenen Punkte entsprechend ihrer Topologie dar (vgl. DANJON, REUBENS, 2007, S.10; SINOQUET, ADAM, DONÈS, o.J., S.2ff)

Zu guter Letzt können alle Daten als (Comma Separated Value) csv-, oder (Multiscale Tree Graph) mtg-Datei abgespeichert werden, um in anderen Programmen eine Visualisierung und eventuelle Analyse der Pflanze zu ermöglichen (vgl. DANJON, REUBENS, 2007, S.10).

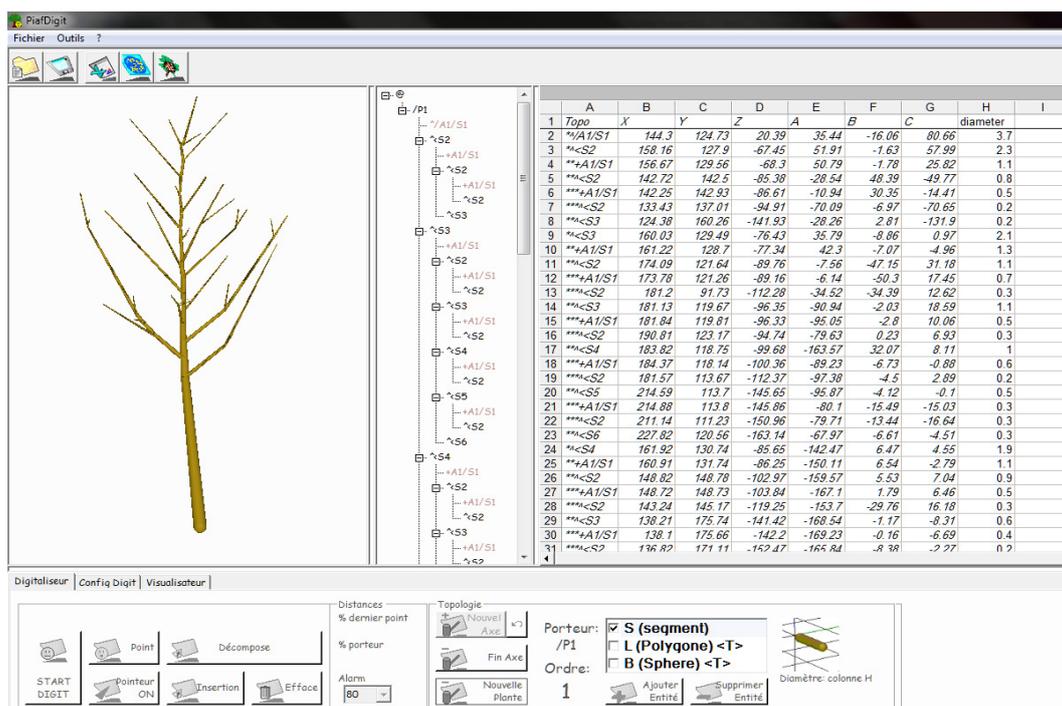


Abbildung 23: Die Programmoberfläche (GUI) von PiafDigit – Links: Vorschau der aufgenommenen Pflanze; Mitte: Übersicht über die Topologie; Rechts: Koordinaten, Euler-Winkel und Pflanzendurchmesser der einzelnen Messpunkte in tabellarischer Form

¹ Das U.M.R. PIAF INRA- UBP ist das Forschungskollektiv (Unité mixte de recherche) für Integrative Physik und Physiologie von Frucht- und Forstpflanzen (Physique et Physiologie Intégratives de l'Arbre Fruitier et Forestier) des französischen nationalen Forschungsinstitutes für Landwirtschaft (Institut national de la recherche agronomique) und der Universität Blaise Pascal in Clermont-Ferrand, Frankreich

5.1.3. Die Versuchspflanze (Eberesche – *Sorbus aucuparia*)

Als Messobjekt diente eine Eberesche (*Sorbus aucuparia*). Sie zählt zur Familie der Rosengewächse (*Rosaceae*). Die Pflanze besitzt eine hohe Toleranz bezüglich des Bodens. Sie ist sowohl auf sauren als auch auf kalkhaltigen Böden anzutreffen und verträgt direktes Sonnenlicht. Weitere Eigenschaften sind eine gute Frosthärte, sowie die Unempfindlichkeit gegenüber nassen Böden, die Regenerationsfähigkeit bei mechanischen Verletzungen und rascher Zuwachs in den ersten 20 Jahren. Dadurch erweist sich die Pflanze als hervorragend geeignet in einem Transportbehälter über einen längeren Zeitraum vital zu bleiben, um Messungen zu verschiedenen Zeitpunkten und Orten durchzuführen (vgl. BRUNS, 2007, S. 549; KREUZER, 1998, S.153).

Das Gehölz wurde Anfang April 2010 von den beiden Mitbetreuern Univ. Ass. DI Dr.nat.techn. Johann Peter Rauch und DI Clemens Weissteiner aus dem Versuchsgarten in Eßling ausgegraben und zum einfacheren Transport in einen 70 Liter Kübel eingetopft.

Zum Zeitpunkt der ersten Aufnahme, Ende April 2010, besaß sie eine Stammhöhe von rund 2,2 Metern.

5.2. Vorarbeiten

Eine genauere Beschreibung der folgenden Arbeiten wurde bereits im Kapitel 5.1.1.1 Aufbau des Polhemus Fastrak abgehandelt und wird im Folgenden nur kurz zusammengefasst.

5.2.1. Aufbau

Beim Aufbau wurde auf die bereits erwähnten Regeln geachtet:

- stabiler Standort für den Sender
- größtmöglicher Abstand zu metallischen Gegenständen (mindestens dreifacher Abstand zwischen Sender und Empfänger), sowie zum Computer und der ‚System Electronic Unit‘ (SEU).
- alle Messpunkte liegen innerhalb des Operationsradius
- kein Überkreuzen der Kabel während der Aufnahme

5.2.2. Einstellungen und Umgebungsevaluierung

Zu Beginn der Einstellungsarbeiten nahmen wir grob die „Eckpunkte“ unseres Objektes auf und überprüften die Koordinaten in Hinblick auf einen Wechsel der Mess-Hemisphäre. Nachdem sichergestellt worden ist, dass sich sämtliche Messpunkte innerhalb der gleichen Halbkugel befanden, fand eine Überprüfung der Abstands-Einstellungen zwischen Empfänger-Ursprung und -Spitze statt.

Danach erfolgte die Evaluierung der Messumgebung. Die Mehrfachmessungen an diversen Punkten verliefen zufriedenstellend, da kein Hinweis auf ein Rauschen der Ergebnisse gefunden wurde.

Ebenso zeigten die Resultate der Distanz-Genauigkeitsmessungen kein Überschreiten der Messergebnisse über die festgelegte Fehlertoleranzmarke von 1 Zentimeter. Somit konnte mit der Pflanzenaufnahme begonnen werden.

5.3. Pflanzenaufnahme

Da das Ziel dieser Arbeit keine Entwicklung von Wachstumsmodellen, sondern lediglich die Erstellung eines Pflanzenmodells ist, wurde nicht speziell auf Pflanzenmodule (vgl. Kapitel 2.2.1 Modularer Aufbau von Pflanzen) Rücksicht genommen.

Die Aufnahmen erfolgten im April 2010 und April 2011.

Zur Fehlerreduktion waren an den Digitalisierungen jeweils zwei Personen beteiligt. Während eine Person mit dem EM-Empfänger die Oberfläche der Pflanze punktweise abtastete und die entsprechenden Durchmesser in den einzelnen Punkten maß, bediente die andere Person den Computer. Ihre Aufgabe war es, dem Programm PiafDigit die aktuelle Achsen-Ordnung bekannt zu geben und die gemessenen Durchmesser neben den entsprechenden 3d-Koordinaten einzutragen.

Wir begannen unsere Aufnahme an der Stammbasis und bewegten uns in Richtung Spitze der Pflanze, wobei wir an jedem Punkt, an dem sich die Charakteristika der Pflanze veränderten (abnehmender Stammdurchmesser, Abzweigung, usw.), die 3d-Koordinaten an der Oberfläche und gleichzeitig den Stammdurchmesser in besagtem Punkt erhoben.

Bei Erreichen eines Verästelungspunktes wurde bei dem Ast höherer Ordnung (zum Beispiel: Ast 2. Ordnung) fortgefahren, bis dessen Spitze erreicht wurde. Danach wurde der Digitalisierungsvorgang an dem Ast niederer Ordnung (Stamm- 1. Ordnung) oberhalb der Verästelung fortgesetzt. Im Falle eines Auftretens weiterer Äste während der Messung des Astes 2. Ordnung wurde analog vorgegangen (vgl. SINOQUET, RIVET, 1996, S.266).

Wichtig hierbei ist es, die Messungen normal auf den Ast durchzuführen, damit die Umrechnung der Messpunkte auf ihre entsprechenden Pflanzenachsen korrekte Ergebnisse liefert (vgl. Abbildung 24 bzw. Kapitel 5.4 Nachbearbeitung - Koordinatentransformation).

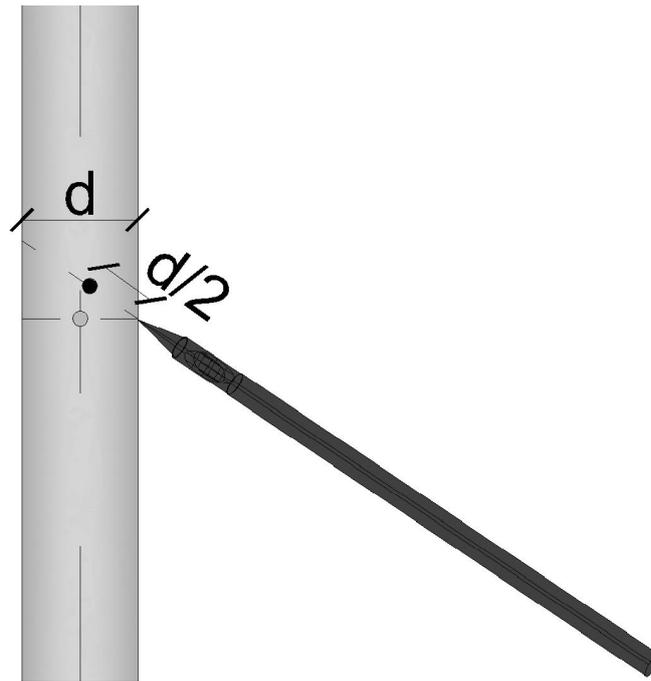


Abbildung 24: Auswirkung einer Messung welche nicht im rechten Winkel durchgeführt wurde

Die Aufnahme des Durchmessers wurde aufgrund der Sensibilität des Polhemus Fastrak auf metallische Gegenstände in der unmittelbaren Umgebung mit einem Plastik-Messschieber durchgeführt.



Abbildung 25: Aufnahme der Versuchspflanze Sorbus aucuparia im Versuchsgarten Essling im Mai 2011

5.3.1. Zwischenergebnis

Das Ergebnis nach der ersten Messung war eine Liste mit 350 Punkten, welche die Lage der einzelnen Punkte in der Topologie und im 3d-Raum, jedoch an der Oberfläche der Pflanze beinhaltete. Des Weiteren wurden zu jedem Punkt die dazugehörigen Euler-Winkel und die entsprechenden Durchmesser aufgezeichnet.

Um die digitalisierte Pflanze möglichst realistisch am Computer abzubilden, müssen die Rohdaten von der Oberfläche auf die Pflanzenachsen umgerechnet werden, da das Modell zu diesem Zeitpunkt einen konstanten Fehler von einem halben Durchmesser in verschiedene Richtungen beinhaltet. Dies hätte vor allem Auswirkungen auf Achsen höherer Ordnungen (2. Ordnung, 3. Ordnung, usw.), da ihr Ursprungspunkt nicht auf der Achse, sondern an einer beliebigen Stelle an der Oberfläche läge. Dadurch käme es neben der unkorrekten Lage zu unbeabsichtigten Änderungen der Orientierung und einer möglichen Erhöhung des später berechneten Volumens.

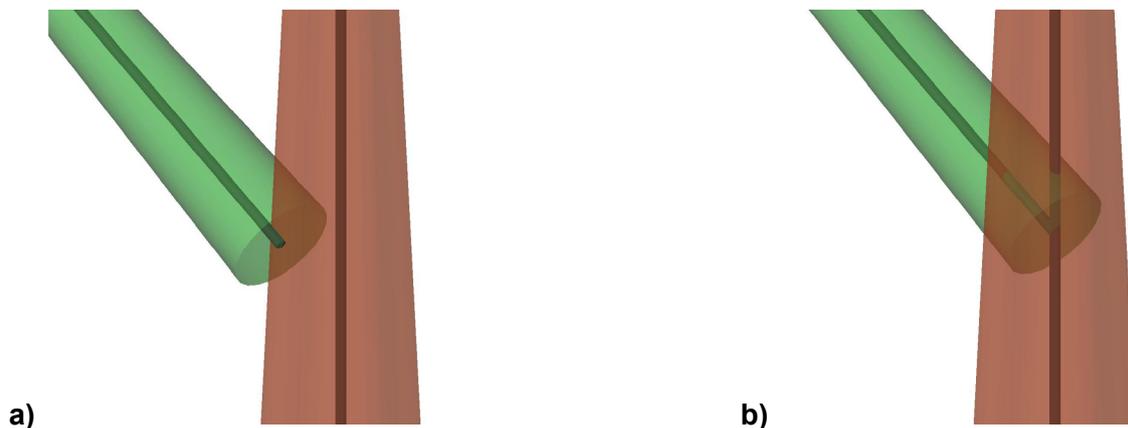
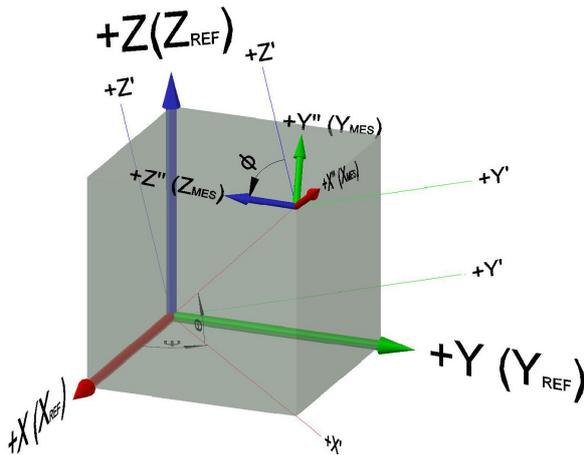


Abbildung 26: Unterschied in der Lage der Ursprungspunkte der Äste 2. Ordnung (grün) entlang der Äste 1. Ordnung (braun): a) Lage an der Oberfläche; b) Lage auf der Achse des Astes 1. Ordnung

Das folgende Kapitel behandelt die genaue Umrechnung sämtlicher Koordinaten auf ihre entsprechende Lage auf den Pflanzenachsen.

5.4. Nachbearbeitung - Koordinatentransformation

Wie bereits erwähnt, werden sämtliche Messpunkte an der Oberfläche des Körpers aufgenommen. Um ein geometrisch korrektes Modell zu erzeugen, ist es jedoch notwendig die Punkte auf die Achsen umzulegen und erst danach die aufgenommenen Durchmesser in das Modell einzuspielen. Hierbei ergibt sich das Problem, dass jeder aufgenommene Punkt sein eigenes Koordinatensystem (x_{mes} , y_{mes} und z_{mes}), mit einem eigenen Ursprung und einer eigenen Orientierung, besitzt.



X, Y, Z = Lage der Referenz-Koordinatensystems ($X_{ref}, Y_{ref}, Z_{ref}$) des Senders

X'', Y'', Z'' = gedrehtes Sensor-Koordinatensystem ($X_{mes}, Y_{mes}, Z_{mes}$) des Empfängers

Euler-Winkel:

Ψ = Azimuth, θ = Elevation, ϕ = Roll

Abbildung 27: Definition der Koordinatensysteme

Weil eine "sture" Addition des halben Durchmessers mit der X-Koordinate des Referenzsystems (X_{ref}) nicht nur die Richtung in Stylus-Achse (x_{mes}) berücksichtigt, sondern unter Umständen auch eine y_{mes} - und z_{mes} -Komponente besitzt, müssen alle gemessenen Punkte parallel zum Referenzsystem gedreht werden, ehe die jeweilige x_{mes} - Koordinate neu berechnet werden kann (vgl. Kapitel 5.1.1 Das elektromagnetische Digitalisierungsinstrument). Damit die relativen Abstände der jeweiligen Punkte zueinander wiederhergestellt werden, ist es notwendig die vorher durchgeführte Koordinatensystemdrehung mit den neu berechneten Punkten wieder rückgängig zu machen. In Abbildung 28 und Abbildung 29 werden die eben erwähnten Vorgänge grafisch erklärt.

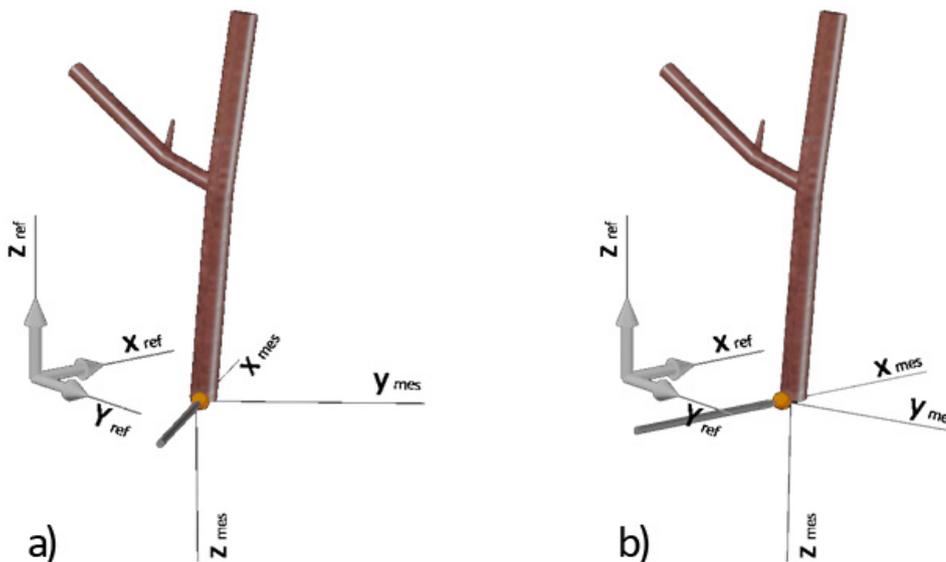


Abbildung 28: Grafische Darstellung der Koordinatentransformation: a) Punkt in Ausgangslage (Punkt liegt an der Oberfläche); b) Drehung des individuellen Koordinatensystems eines Messpunktes in das Referenzkoordinatensystem

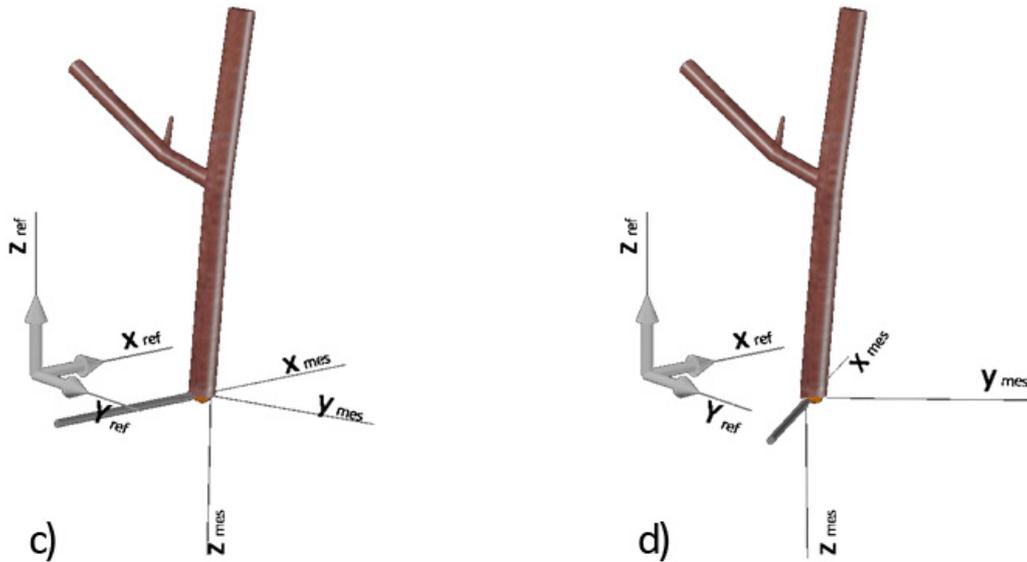


Abbildung 29: Grafische Darstellung der Koordinatentransformation: c) Hinzufügen des halben Stammdurchmessers in X_{ref}-Richtung (Punkt liegt auf der Stammachse); d) Zurückdrehen des Koordinatensystems in die Ausgangslage

Um die Paralleldrehung zu bewerkstelligen, muss auf die Zusatzinformationen der aufgenommenen Koordinate, die Euler'schen Winkel und den Stammdurchmesser zurückgegriffen werden.

Im folgenden Kapitel werden die oben erwähnten Vorgänge mathematisch erklärt.

5.4.1. Drehen der Punkte

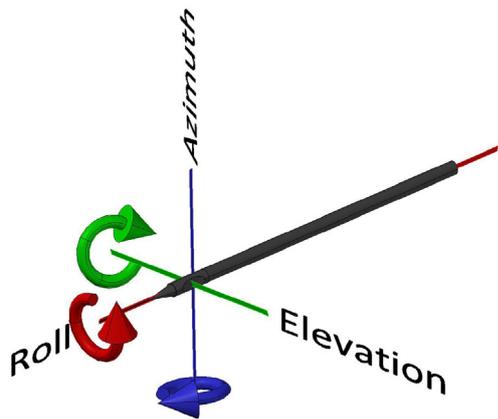


Abbildung 30: Stylus – Definition der Euler'schen Winkel

Die aufgenommenen Punkte werden laut dem Hersteller des Fastrak in folgender Reihenfolge im Raum gedreht und die entsprechenden Werte in die mtg-Datei eingespielt (vgl. POLHEMUS, 2005, p.C-5): AZIMUTH – ELEVATION - ROLL

Wie in Punkt 2.6 Euler-Winkel beschrieben, stellt jeder Schritt eine Drehung des gesamten Koordinatensystems um eine bestimmte Achse dar. Durch die vom System festgelegte Reihenfolge der Drehungen ist es notwendig diese in umgekehrter Richtung durchzuführen, da die Achsen ansonsten nicht in der Parallellage zum Referenzkoordinatensystem zu liegen kämen. Somit lautet die Reihenfolge: ROLL- ELEVATION- AZIMUTH

Mathematisch ausgedrückt sehen die Matrizen der einzelnen Drehungen folgendermaßen aus:

$$\begin{array}{ccc}
 \text{Roll} & \text{Elevation} & \text{Azimuth} \\
 \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(R) & \sin(R) \\ 0 & -\sin(R) & \cos(R) \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \cos(E) & 0 & -\sin(E) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(E) & 0 & \cos(E) \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \cos(A) & -\sin(A) & 0 \\ \sin(A) & \cos(A) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}
 \end{array}$$

Formel 1: Matrizenschreibweise der Drehungsreihenfolge des Fastrak (vgl. POLHEMUS, 2007, S. C-1)

Eine Neuberechnung der Koordinaten ist auf zwei verschiedene Arten zu lösen: Durch schrittweise Multiplikation der XYZ-Koordinaten mit den oben angeführten Matrizen oder durch vorhergehende Matrixmultiplikation und darauffolgender Multiplikation mit den Koordinaten. Hier wurde letztere Möglichkeit angewendet.

Die multiplizierte Matrix, mit der Reihenfolge Roll – Elevation – Azimuth:

$$\begin{pmatrix} \cos(E) * \cos(A) & \cos(E) * \sin(A) & -\sin(E) \\ \sin(R) * \sin(E) * \cos(A) - \cos(R) * \sin(A) & \sin(R) * \sin(E) * \sin(A) + \cos(R) * \cos(A) & \sin(R) * \cos(E) \\ \cos(R) * \sin(E) * \cos(A) + \sin(R) * \sin(A) & \cos(R) * \sin(E) * \sin(A) - \sin(R) * \cos(A) & \cos(R) * \cos(E) \end{pmatrix}$$

Formel 2 :Multiplikationsmatrix der Drehungsmatrizen aus Formel 1

Um nun die Koordinaten parallel zum Referenzsystem zu drehen, müssen die X-, Y- und Z-Koordinaten der jeweiligen Punkte mit dieser Matrix multipliziert werden, wobei die erste Zeile zur X-Transformation, die zweite Zeile zur Y-Transformation und die dritte Zeile zur Z-Transformation herangezogen wird.

Analog muss nun die X-Komponente mit der ersten, die Y-Komponente mit der zweiten und die Z-Komponente mit der dritten Spalte multipliziert werden, um die richtigen Werte zu erhalten.

Als Beispiel wird hier die theoretische Transformation einer X-Koordinate durchgeführt:

$$x_{gedreht} = x_{messung} * \cos(E) * \cos(A) + y_{messung} * \cos(E) * \sin(A) + z_{messung} * -\sin(E)$$

Formel 3: Beispiel einer Transformation der x-Koordinate eines gemessenen Wertes

5.4.2. Hinzufügen des halben Stammdurchmessers

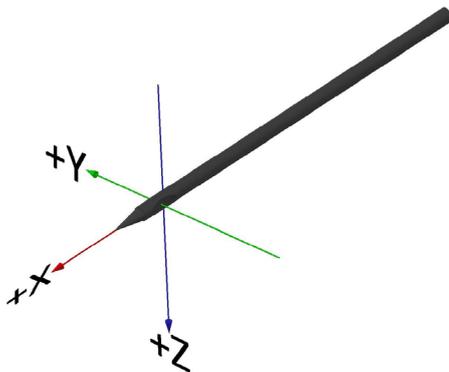


Abbildung 31: Achsdefinition des Stylus

Entlang der Längsachse des Stylus befindet sich die X-Achse des Empfängers. Unter der Annahme, dass die Pflanze in den einzelnen Messpunkten eine runde Form besitzt, ist es nun möglich, nachdem die Koordinatentransformation erfolgt ist, durch Addition des halben gemessenen Durchmessers zur X-Koordinate den Punkt rechnerisch auf die Pflanzenachse zu legen.

Um nun die relativen Abstände der Punkte zueinander herzustellen, werden die zurückgedrehten Koordinaten wieder in ihre Ausgangs-Drehung gebracht.

5.4.3. Wiederherstellung der Ausgangskoordinatensysteme

Die Rückwärtsdrehung der Punkte erfolgt exakt in der umgekehrten Reihenfolge zur vorhin erwähnten Transformation. Somit müssen die Rotationsmatrizen entgegengesetzt ihrer vorherigen Anordnung aufgeschrieben werden:

Azimuth	Elevation	Roll
$\begin{pmatrix} \cos(A) & -\sin(A) & 0 \\ \sin(A) & \cos(A) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \cos(E) & 0 & -\sin(E) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(E) & 0 & \cos(E) \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(R) & \sin(R) \\ 0 & -\sin(R) & \cos(R) \end{pmatrix}$

Formel 4: Umgekehrte Matrizenreihenfolge zur Wiederherstellung der Ausgangskoordinatensysteme

Das Ergebnis der Matrixmultiplikation lautet demnach wie folgt:

$$\begin{pmatrix} \cos(A) * \cos(E) & \sin(A) * \cos(R) + \cos(A) * \sin(E) * \sin(R) & \sin(A) * \sin(R) - \cos(A) * \sin(E) * \cos(R) \\ -\sin(A) * \cos(E) & \cos(A) * \cos(R) - \sin(A) * \sin(E) * \sin(R) & \cos(A) * \sin(R) + \sin(A) * \sin(E) * \cos(R) \\ \sin(E) & -\cos(E) * \sin(R) & \cos(E) * \cos(R) \end{pmatrix}$$

Formel 5: Multiplikationsmatrix der Drehungsmatrizen aus Formel 4

Unter Berücksichtigung der Umkehrung der Vorzeichen der einzelnen Winkel können nun die Koordinatenpunkte entlang der Pflanzenachse analog zur vorherigen Koordinatendrehung berechnet werden.

Um diese Berechnungen zu erleichtern und diesen Vorgang zu automatisieren, wurde im Zuge dieser Arbeit eine Microsoft Excel-Datei erstellt. Nachdem die vom Programm PiafDigit ausgegebenen Punkte transformiert und wieder in das Digitalisierungsprogramm eingespielt worden sind, kann die digitalisierte Pflanze als mtg-Datei abgespeichert werden. Diese Datei ist die Grundlage für den nächsten Schritt: Die Visualisierung.

Der Inhalt der im Zuge dieser Arbeit erstellten mtg-Dateien mit ihren umgerechneten Koordinaten befindet sich im Anhang unter Kapitel A - 4 Aufschlüsselung der Messergebnisse.

6. Die Visualisierung

Nachdem sich durch die oben erwähnten Arbeitsschritte nun die 3d-Koordinaten samt ihrer Durchmesser in einer mtg-Datei befinden, kann mit der Visualisierung und Auswertung der Pflanzeigenschaften begonnen werden.

Hierzu wird das Programm **OpenAlea** (Atelier Logiciel en Ecophysiologie et en Architecture 3d des plantes – Datenbank der Ökophysiologie und Architektur von dreidimensionalen Pflanzen), welches von einer französischen Forschungsgemeinschaft² entwickelt wurde, verwendet.

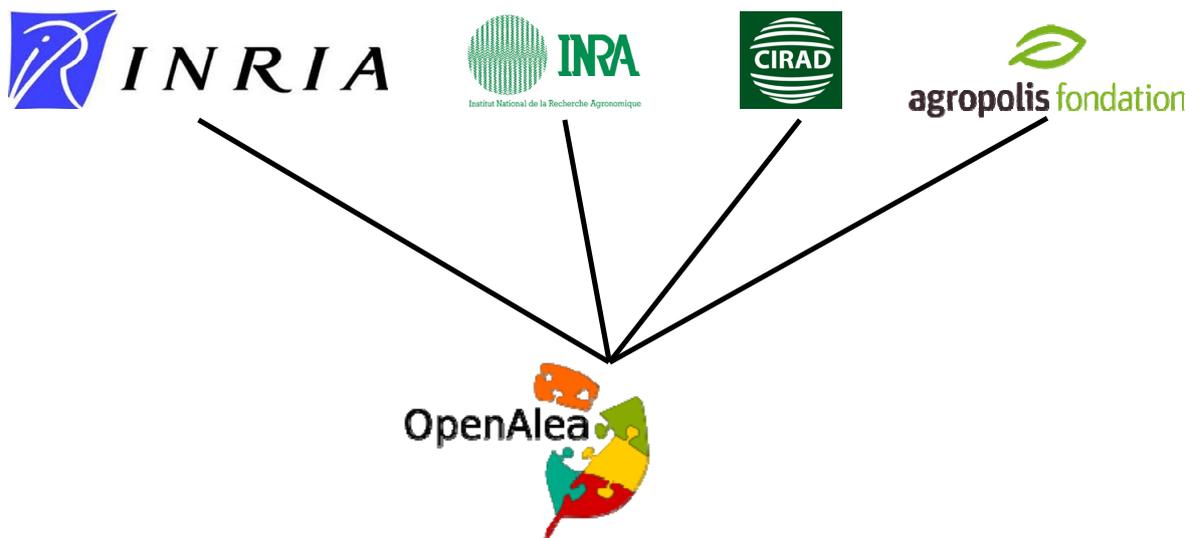


Abbildung 32: Hauptbeteiligte Institute an OpenAlea

Das nachstehende Kapitel beschreibt ausschließlich die Komponenten des Programms OpenAlea, welche zur Behandlung des Themas notwendig sind und stellt somit keine umfassende Beschreibung dar.

²Hauptbeteiligte Institute sind:

INRIA – französisch nationales Forschungsinstitut für Informatik und Automatik (L'Institut national de recherche en informatique et en automatique);

CIRAD - Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement

INRA - französische nationales Forschungsinstitut für Landwirtschaft (Institut national de la recherche agronomique)

AGROPOLIS FOUNDATION

6.1. OpenAlea

Seit Beginn der digitalen Pflanzenvisualisierung und –analyse versuchte man die Ergebnisse diverser Forschungsgruppen untereinander zugänglich und austauschbar zu machen, um komplexere Sachverhalte zu erforschen. Jedoch stellte dies die Programmentwickler vor zum Teil unlösbare Herausforderungen, da die spezialisierten Programme teilweise an Betriebssysteme gebunden und in eigens entwickelten Programmiersprachen (AML,...) entworfen wurden (vgl. PRADAL et al., 2008, S.752ff).

Um die Kompatibilität weiter voran zu treiben, begann man im Jahr 2004 eine Programmplattform zu entwickeln, welche als Übersetzer zwischen den einzelnen Teilprogrammen und Modellen fungiert, auf den gängigsten Betriebssystemen funktioniert und über einen offenen Zugang für Entwickler verfügt (vgl. PRADAL et al. ,2007, S.1ff; PRADAL et al. ,2008, S.755).

Laut PRADAL et al. (2007) und PRADAL et al. (2008) besteht das Programm aus:

- einem System, welches durch ihre Python-basierten Programmierung diverse Sprachen integriert und auf diversen Betriebssystemen anwendbar ist.
- einem modularen Aufbau, welcher die Zusammensetzung und Anwendung von Programmkomponenten erleichtert.
- einer grafischen Programmieroberfläche zur Erstellung und Überprüfung des Programmcodes, sowie einer raschen Erstellung von diversen Pflanzenmodellen und Analyseverfahren.
- einer Schnittstelle für verschiedene Forschungsgruppen zur leichterten Zusammenarbeit.

Als Programmiersprache wurde Python verwendet, da es den oben erwähnten Ansprüchen entspricht und als relativ einfach zu erlernen gilt.

6.1.1. VisuAlea

VisuAlea ist die grafische Programmieroberfläche (engl. Graphical User Interface – GUI) von OpenAlea. Mit der GUI ist es möglich die verschiedenen Komponenten des OpenAlea Programmpaketes im Baukastenprinzip anzuordnen und durch so genannte Dataflows miteinander zu verbinden. Nach Ausführen des zusammengebauten Programmiercodes werden alle Pakete der Reihe nach aktiviert und deren Inhalt abgerufen, welcher im Grunde aus Python Programmzeilen besteht. Somit können auch Benutzer, welche keine Erfahrung im Umgang mit Programmiersprachen haben, ihre eigenen Modelle erstellen und bearbeiten (vgl. PRADAL et al., 2007, S.25-2f).

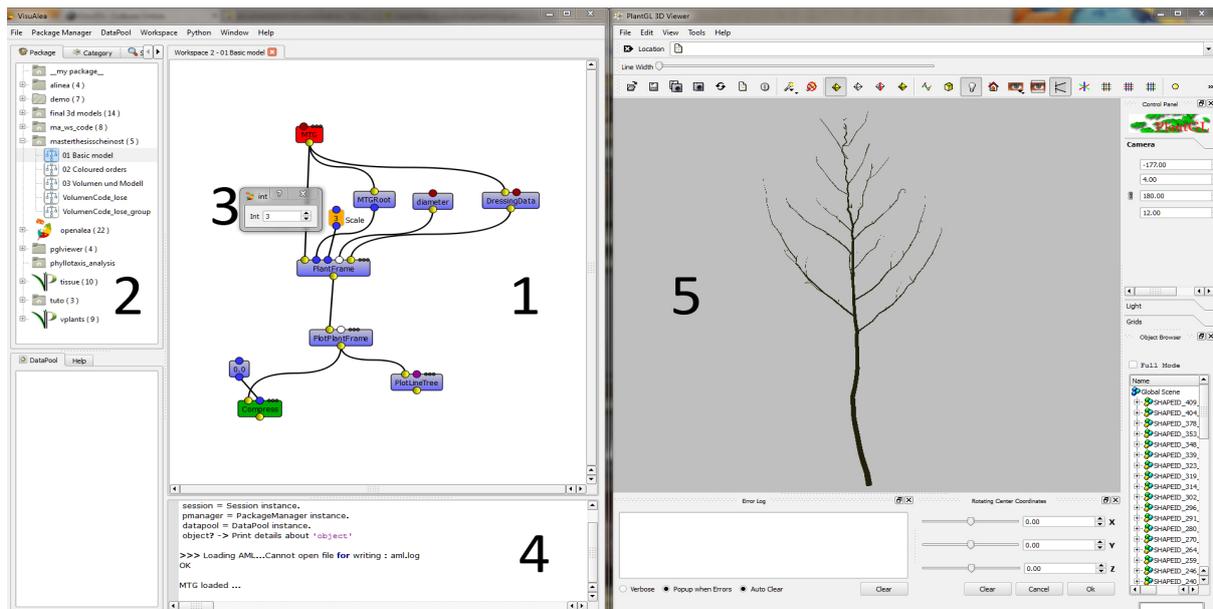


Abbildung 33: VisuAlea GUI:(1) die grafische Programmieroberfläche; (2) Übersicht über die verwendbaren Programmkomponenten – Package manager; (3) Widgets und Widget-Fenster; (4) Python-Interpreter; (5) 3d-Viewer.

Wie in Abbildung 33 zu erkennen ist, besteht der Hauptteil der VisuAlea Benutzeroberfläche, hier mit den Ziffern 1-4 beschriftet, aus **der grafischen Programmieroberfläche (1)**.

Die Nummer 2 bezeichnet den **Paket-Manager** (Package manager). Pakete stehen für die diversen in VisuAlea implementierten Programme. Sie bestehen aus Widgets (vgl. PRADAL et al., 2007, S.25-2f).

Widgets oder Knoten (nodes) stehen für die einzelnen Programmierschritte oder Funktionen der integrierten Programme. Das Ziehen der Widgets aus dem package manager auf die Programmoberfläche importiert die gewünschten Befehle und stellt sie somit für den Programmierungsvorgang bereit (3).

Bei Bedarf ist eine Betrachtung und Bearbeitung der weitergegebenen Informationen durch Aktivierung des Widget-Fensters möglich (vgl. PRADAL et al., 2007, S.25-2f).

4 steht für den Python-Interpreter ein Python-Programmfenster. Durch Eingabe von Befehlen werden hier spezielle Funktionen des Programms gestartet. Es dient auch als schriftliches Ausgabefenster für Berechnungsergebnisse und Fehlermeldungen (vgl. PRADAL et al., 2007, S.25-2f).

Darüber hinaus steht ein **3d-Betrachtungsprogramm, der PlantGL Viewer (5)** zur Verfügung. Hier werden Werkzeuge zur Einstellung der Beleuchtungssituation und des Betrachtungswinkels bereitgestellt. Ebenso können die Modelle in folgende Programmdateien exportiert werden (vgl. PRADAL et al., 2007, S.25-2f und PRADAL et al., 2009, S.4):

- AmapSymbol
- Linetree
- PovRay
- Vrml
- Ply
- VegeStar

Über die Kompatibilität der ausgegebenen Dateien mit den diversen zugehörigen Programmen kann nur bedingt Auskunft gegeben werden. Jedoch war eine Weiterbearbeitung der Modelle in den Programmen AmapMod (Datei: AmapSymbol), POV-Ray (Datei: PovRay) und VegeStar (Datei: VegeStar) aufgrund von Dateifehlern nicht möglich.

Programmieren in VisuAlea

Wie bereits erwähnt, stellen Widgets die einzelnen Programmierschritte dar. In der Regel verfügen sie über einen Eingang zur Aufnahme von Informationen an der Oberseite und einen Ausgang zur Informationweitergabe unten.

Um das gewünschte Ergebnis zu erhalten, ist es nun notwendig die dafür benötigten Knoten in der korrekten Reihenfolge anzuordnen und durch Dataflows (schwarze Linien, die den Datenfluss zwischen den Widgets darstellen) zu verbinden. Hierbei muss auf die entsprechenden „Arten“ der weitergegebenen Information geachtet werden, da nicht jede Tabelle, Variable oder entsprechende andere Information von allen Widgets gleichermaßen verstanden wird (vgl. PRADAL et al., 2008, S.13 und 30).

Damit sie nicht bei jedem Projekt neu angeordnet werden müssen können komplexere Programmierschritte gruppiert und im package manager abgespeichert werden. Diese zusammengefassten Schritte werden als composite nodes bezeichnet. Um Fehler laufend zu überprüfen, besteht die Möglichkeit in jedem Schritt nach Ausführen des bisher erstellten Programmcodes die weitergegebenen Informationen zu begutachten (vgl. PRADAL et al., 2007, S.25-2f).

Eine grafische Erklärung des Programmiervorganges befindet sich im Anhang unter dem Kapitel A - 3.1 Programmieren in VisuAlea.

6.2. Modellerstellung

Zur Erstellung eines einfachen 3d-Modells der aufgenommenen Eberesche wurde ein bereits bestehendes, in VisuAlea implementiertes Programm, erstellt von GODIN et al. (o.J.), herangezogen und für den eigenen Bedarf adaptiert (Abbildung 34).

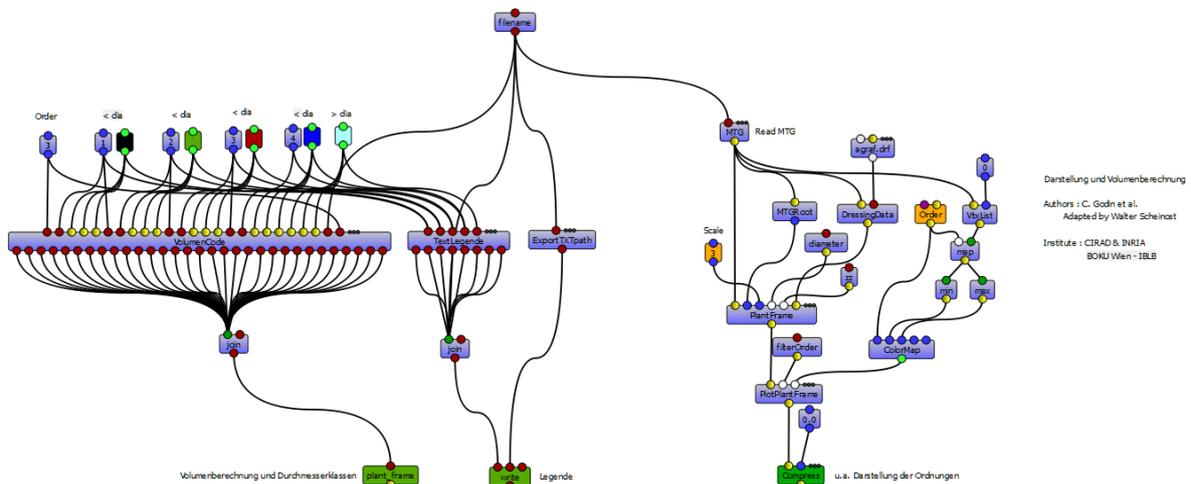


Abbildung 34: Darstellung des Ergebnisses der visuellen Programmierung in VisuAlea. Durch Ausführen des Widgets "plant_frame" (unten links) wird das 3d Modell der Pflanze dargestellt, automatisch das Volumen berechnet und im Python-Interpreter ausgegeben.

Die Adaption befindet sich im linken Abschnitt der Abbildung 34. Sie besteht in der benutzerfreundlichen Implementierung eines Python-Codes zur Berechnung des Volumens und gleichzeitiger Darstellung des Modells mit unterschiedlichen Farben für bestimmte Stärkeklassen der einzelnen Stammdurchmesser (siehe Anhang, Kapitel A - 3.2 Programmcode zur Berechnung des Volumens). Dieser Python-Code wurde uns von Christophe GODIN zur Verfügung gestellt.

Jedoch wurde die laufende Einspielung der Programmzeilen in den Python-Interpreter mit der Zeit als mühsam wahrgenommen und führte durch die fehleranfällige Eingabe des mtg-Dateipfades oftmals zu keinem Ergebnis. Deshalb wurde kurzerhand beschlossen, die Zeilen als grafische Elemente in das Programm einzubauen, um diese Probleme zu beheben.

Vorteil dieser Methode war auch, den Klassen der Stammdurchmesser Grenzwerte, aber auch spezifische Farben zuzuteilen. Ebenso wurde ein Abschnitt zur automatischen Legenderstellung in das Verzeichnis der mtg-Datei mit eindeutiger Dateizuordnung zum entsprechenden mtg beigefügt um die Farben der Klassengrenzen zu dokumentieren.

Der rechte Abschnitt der Programmierung in Abbildung 34 bewirkt eine Darstellung des 3d-Modells ohne Berechnung des Volumens. Dafür können hier die verschiedenen Ordnungen der Achsen durch eine farblich unterschiedliche Darstellung visualisiert werden. Auch hier ist lediglich das Laden der Datei nötig, um das Ergebnis nach Aktivierung des Codes zu begutachten.

7. Die Ergebnisse

Dieses Kapitel beinhaltet die Darstellung und Analyse der Ergebnisse. Die nötigen Arbeitsschritte werden hier noch einmal zusammengefasst:

- Aufbau und Umgebungsevaluierung zur Feststellung der Messungenauigkeiten.
- Aufnahme der Versuchspflanze mit den Polhemus Fastrak und dem Programm PiafDigit. Das Ergebnis: Eine mtg-Datei der topologischen Eigenschaften mit samt den räumlichen Koordinaten von markanten Punkten, wie Durchmesser- veränderungen, Krümmungen und Astpunkten an der Oberfläche der Pflanze.
- Koordinatentransformation der aufgenommenen Punkte und Einspielen der korrekten mtg – Datei in VisuAlea. Das Ergebnis: Dreidimensionale Darstellungen der Pflanze wahlweise mit farblicher Unterscheidung der Ordnungen oder einer Klassifizierung der Stamm-/Astdurchmesser in den Messpunkten.

Der Zeitaufwand von Beginn des Aufbaues bis zur Erstellung des fertigen Modells der rund zwei Meter hohen Pflanze betrug rund eine Stunde.

Folgende Tabelle zeigt die Verteilung des Zeitaufwandes:

Vorarbeiten (Kapitel 5.2)	15 Minuten
Messung an der Pflanze (Kapitel 5.3)	40 Minuten
Nachbearbeitung und Modellerstellung (Kapitel 5.4 und 6.2)	5 Minuten
Summe	60 Minuten

Tabelle 9: Zeitaufwand einer Pflanzendigitalisierung samt Modellerstellung

Neben den Modellen werden auch die dazugehörigen Programmierungsschritte dargestellt und kurz erläutert.

7.1. Darstellung des Pflanzenmodells

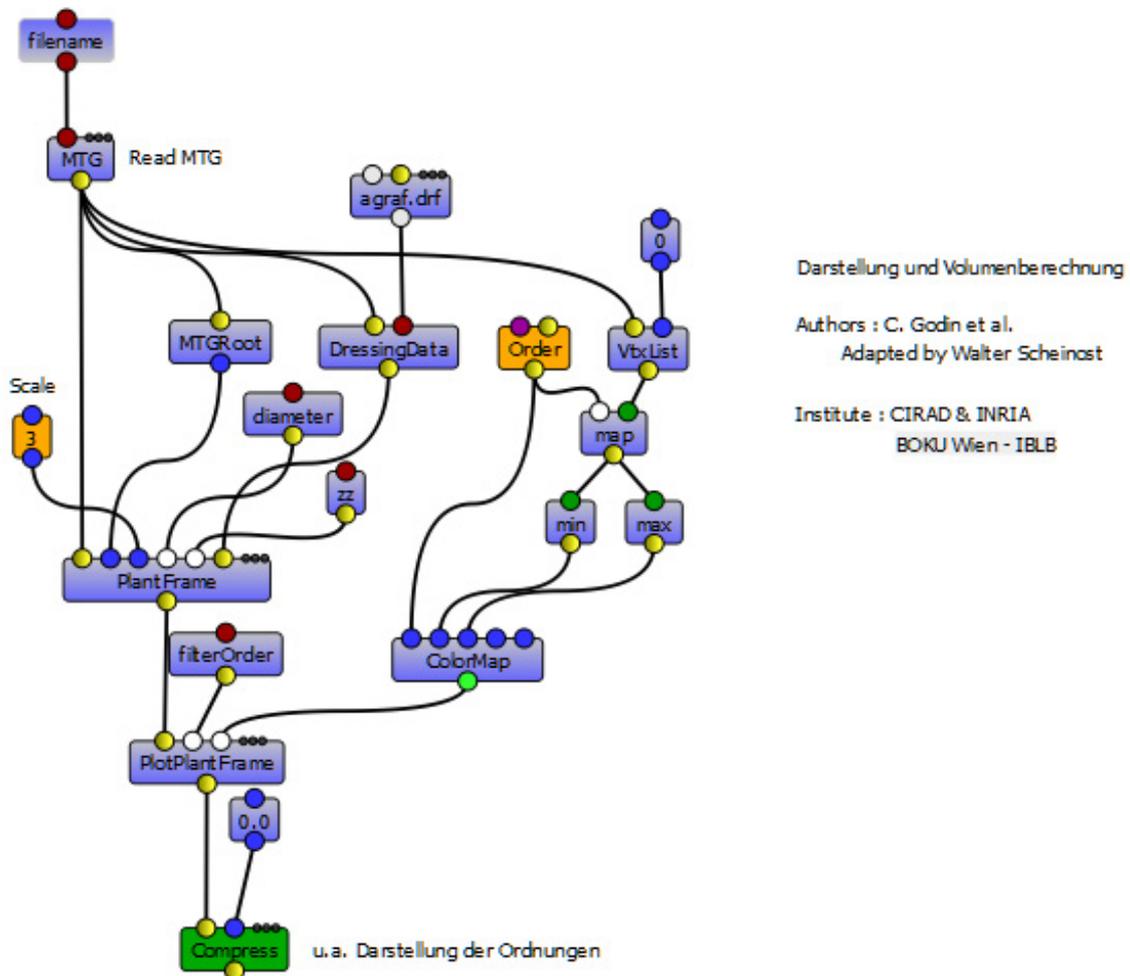


Abbildung 35: VisuAlea Programm zur Darstellung des Pflanzenmodells.

An der Spitze dieses Dataflows wird das mtg geladen, welches in weiterer Folge abgebildet werden soll. Direkt darunter befinden sich die Widgets zur Darstellung eines aufrecht stehenden Pflanzenmodells (Plantframe). Auf der rechten Seite liegen die nötigen Schritte, um das Modell, dem gewünschten Ergebnis entsprechend, einzufärben (hier: Darstellung nach Ordnungen).

Durch Ausführen des Widgets “Compress“ wird das Modell im PlantGLViewer angezeigt.

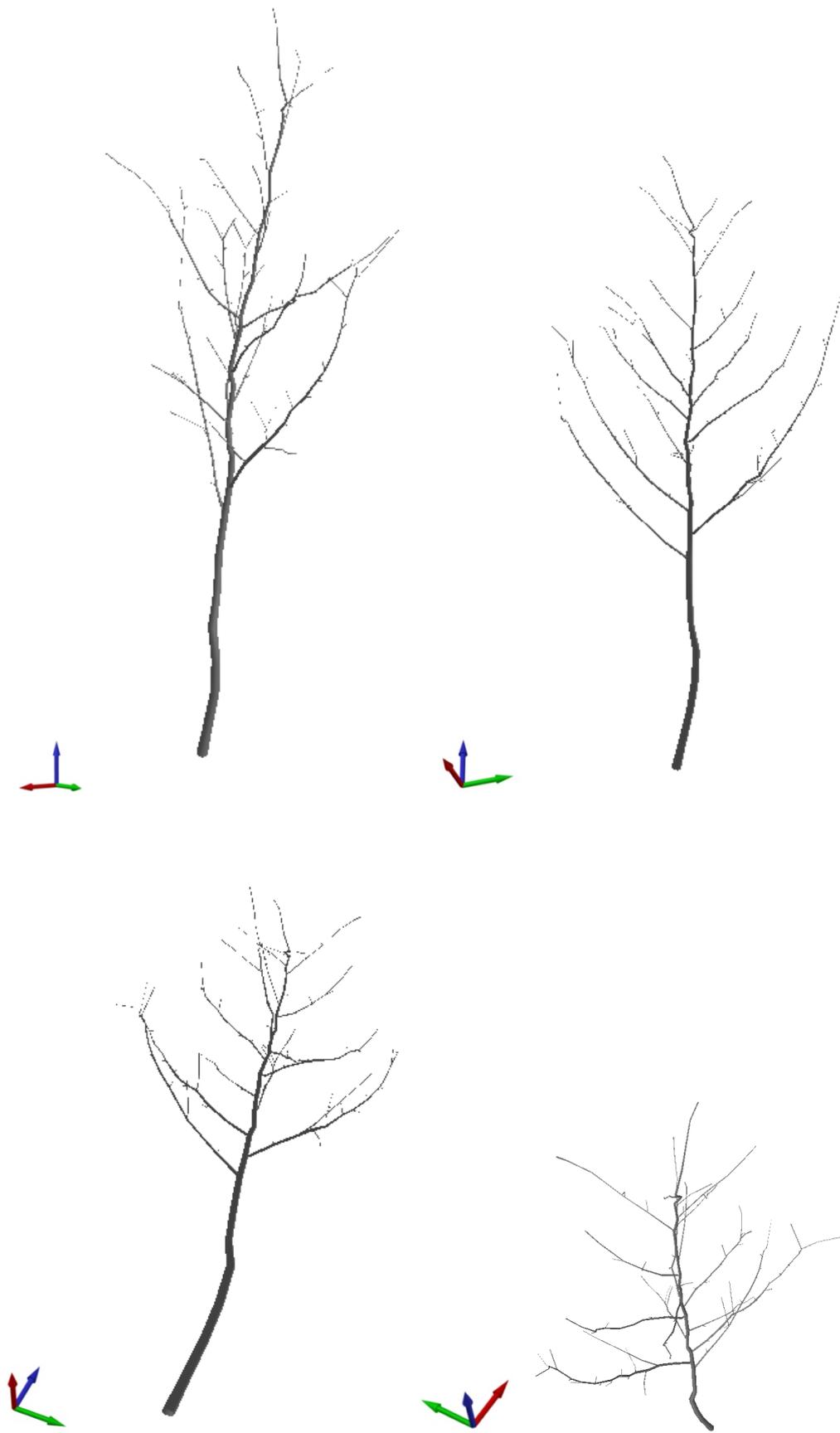


Abbildung 36: Darstellung der virtuellen Versuchspflanze aus verschiedenen Perspektiven

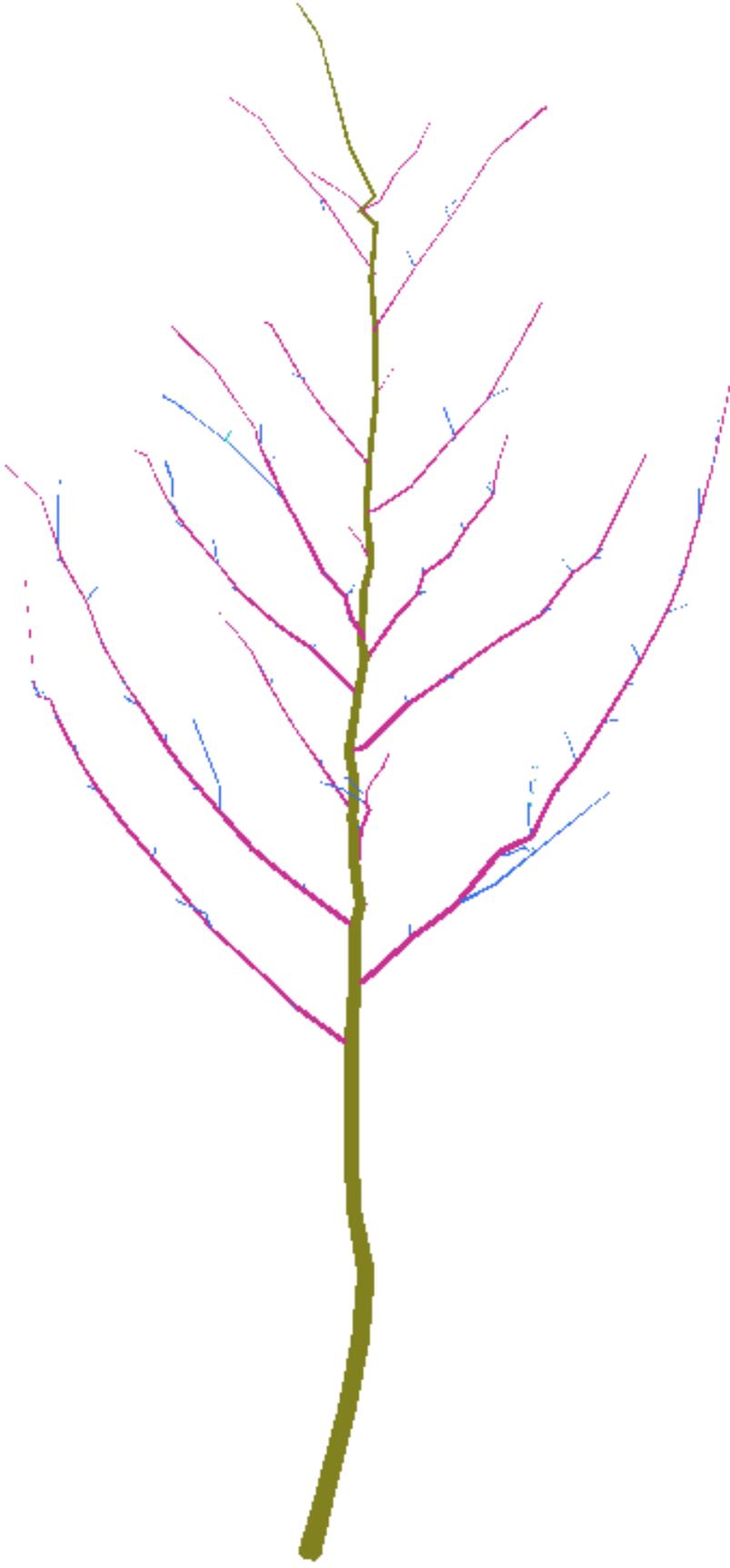


Abbildung 37: Darstellung der Eberesche mit unterschiedlich eingefärbten Ast-Ordnungen – Grün: Stamm (1. Ordnung); Magenta: Äste 2. Ordnung; Cyan: Äste 3. Ordnung

7.2. Erste Versuche – Festlegen der Messgenauigkeiten

Nach der ersten erfolgreichen Aufnahme versuchten wir den nötigen Arbeitsaufwand zu optimieren und begannen die Versuchspflanze mit unterschiedlichen Genauigkeitsgraden aufzunehmen. Stellvertretend hierfür werden die gröbste, also ungenaueste und die exakteste Aufnahme präsentiert. Der wesentliche Unterschied der beiden Aufnahmen besteht in der Anzahl der erhobenen Punkte:

- Die grobe Aufnahme (Abbildung 38 – links) besteht aus 47 Messpunkten. Hier wurden lediglich die Äste 1. und 2. Ordnung an den Verästelungsstellen und den jeweiligen Spitzen aufgenommen. Der Zeitaufwand betrug 10 Minuten.
- Die exakte Aufnahme (Abbildung 38 - rechts) enthält 350 Punkte. Im Zuge dieser Messung wurde darauf Wert gelegt, sämtliche Veränderungen der Astcharakteristika (Abnahme des Durchmessers, Änderung der Orientierung, usw.) aufzunehmen. Die Messung dauerte 40 Minuten.



Abbildung 38: Vergleich von Aufnahmen mit unterschiedlichem Genauigkeitsgrad; links: grobe Aufnahme mit 47 Messpunkten; rechts: Aufnahme mit 350 Messpunkten

Der Vergleich zeigt deutliche Unterschiede zwischen den beiden Genauigkeitsgraden. Während die Darstellung der groben Aufnahme einem schematisch vereinfachten Bild eines Baumes gleicht, weist die exakte Aufnahme, wie auch in Kapitel 7.3 beschrieben, eine deutliche Ähnlichkeit mit der Versuchspflanze auf. Somit wurde bei weiteren Aufnahmen trotz des vermehrten Zeitaufwandes auf eine größtmögliche Exaktheit der Messung geachtet.

7.3. Vergleich: Virtuelles Modell – Reale Pflanze



Abbildung 39: Optischer Vergleich der virtuellen Pflanze (oben links) mit dem Original (oben rechts), sowie eine Überlagerung der Bilder (unten) – Aufnahme April 2011

Der optische Vergleich des virtuellen Modells mit der realen Pflanze zeigt eine gute Übereinstimmung. Auch wenn es im oberen Bereich vereinzelt Unstimmigkeiten im Sinne der Orientierung gibt, wird das Modell als zufriedenstellend angesehen, da Astlängen und Durchmesser größtenteils ähnlich bis gleich sind.

Die auftretenden Ungenauigkeiten sind nicht zwangsläufig durch eine Beeinträchtigung des elektromagnetischen Digitalisierungsinstrumentes entstanden. Mögliche andere Gründe für die Abweichungen sind:

- **Festlegen der Messungenaugigkeit:** Für unsere Aufnahme wurden Abweichungen von bis zu 1 cm vom Realwert als ausreichend angesehen.
- **Messungenaugigkeit durch die Person:** Insbesondere bei dünnen Ästen kann eine kleinräumige Änderung der Lage bei berühren der Oberfläche nicht ausgeschlossen werden.
- **Sensible Einstellung der Perspektive im Programm PlantGL:** Da kaum wahrnehmbare Änderungen der Computermaus bereits Auswirkungen auf die Ansicht des Modells haben, wird die Auswahl der hundertprozentig korrekten Perspektive erschwert.
- **Wetter:** Insbesondere bei jungen Pflanzen und dünnen Ästen bewirken bereits kaum wahrnehmbare Windböen Veränderungen in der Lage, welches ein Messen am tatsächlichen Standort beeinträchtigt.

7.4. Darstellung der Durchmesserklassen

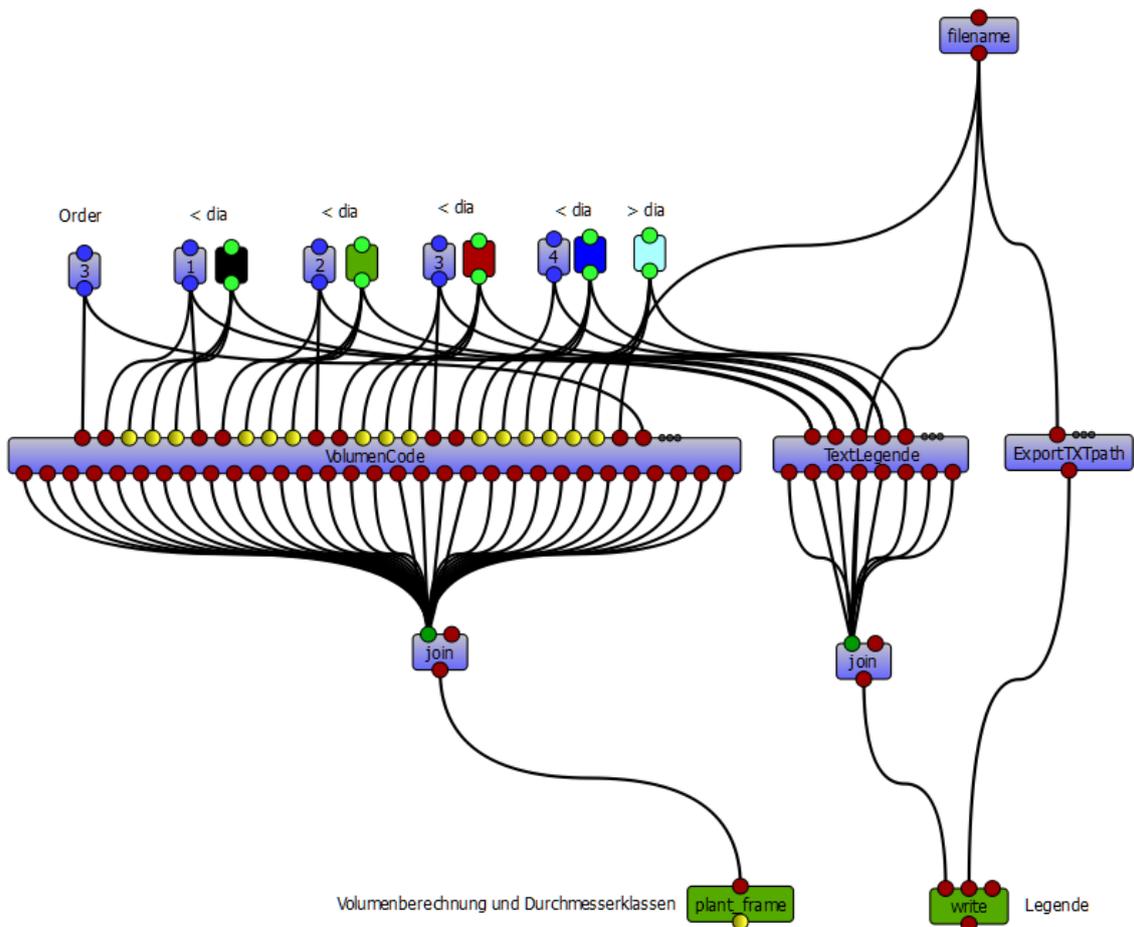


Abbildung 40: VisuAlea Programmierung zur Errechnung des Volumens unter gleichzeitiger Darstellung des Modells mit unterschiedlich eingefärbten Durchmesserklassen und automatischer Legendenerstellung.

Abbildung 40 zeigt den Dataflow zur Darstellung der unterschiedlichen Durchmesserklassen in verschiedenen Farben mit gleichzeitiger Berechnung des Volumens. Das Widget “VolumenCode” beinhaltet die unveränderbaren Programmzeilen, während darüber die variablen Eingaben zur einfachen Adaptierung herausgehoben wurden.

Somit ist man in der Lage für jedes Modell eigene Klassen zu bestimmen und durch die gewünschten Farben darzustellen. Der Pfad zur mtg-Datei wird unter “filename” ausgewählt. Während “write” die Legende zur späteren Eruiierung automatisch in eine der Eingangsdatei eindeutig zuordenbare txt-Datei exportieren kann, wird unter “plant-frame” das Durchmesserklassenmodell angezeigt.

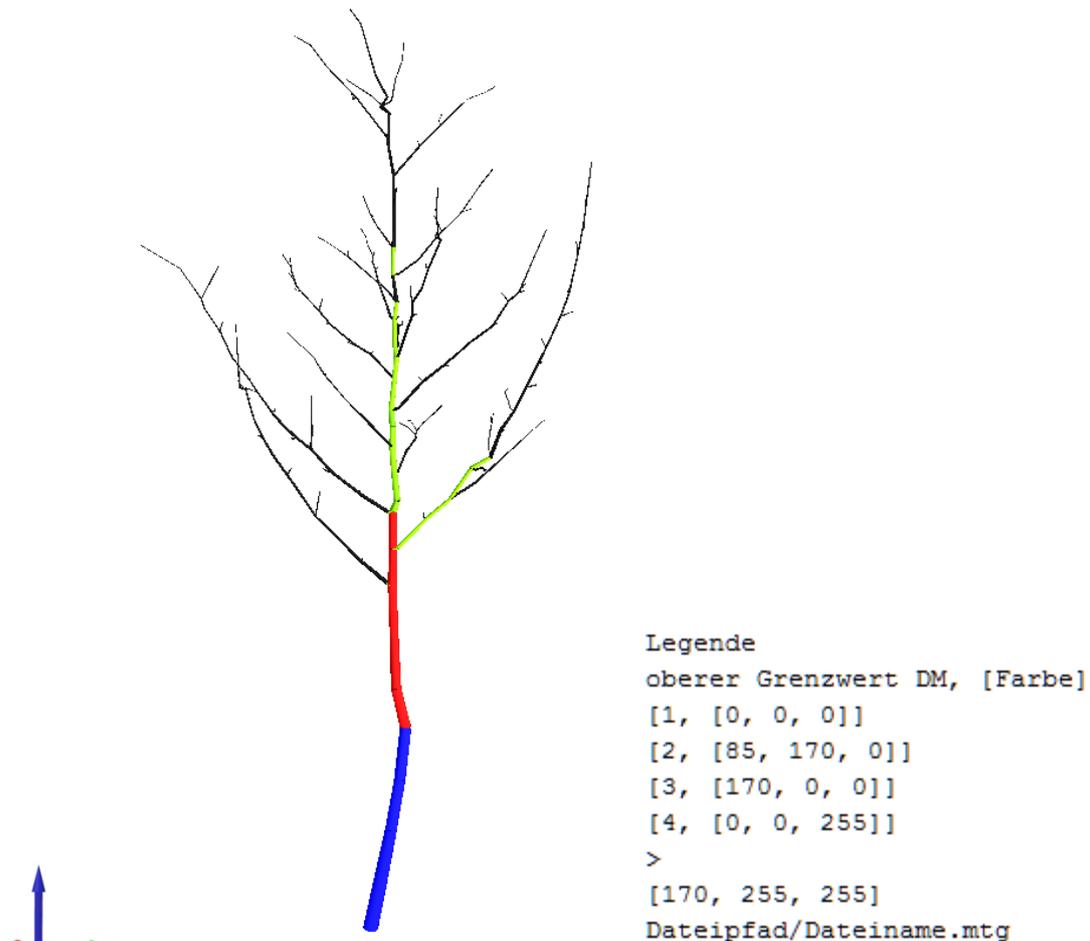


Abbildung 41: Ergebnis nach Ausführung des Dataflows von Abbildung 40: Darstellung der *Sorbus aucuparia* mit unterschiedlich eingefärbten Stamm-/Astdurchmessern mit entsprechender Legende. Aufgrund der Programmstruktur werden die Farben nur als RGB-Zahlenwert ausgegeben.

7.5. Entwicklung der Pflanze innerhalb einer Vegetationsperiode

Um die Entwicklung unserer Versuchspflanze im Verlauf von einer Vegetationsperiode darzustellen, wurde diese zweimal im Abstand von einem Jahr digitalisiert und das Modell erstellt. Bevor die tatsächliche Auswertung behandelt wird, werden die Modelle kurz erläutert.

7.5.1. Aufnahme April 2010

Die erste Aufnahme fand am 19. April 2010 im Garten des Schwachhöfer-Hauses der Universität für Bodenkultur statt und umfasst 350 aufgenommene Punkte. Nach dem Aufbau fand eine Evaluierung der Messumgebung statt. Da es innerhalb des Abstandes von 3,7 Meter um den Transmitter keine Abweichungen über 3 cm vom realen Wert gab, wurde der Standort als geeignet betrachtet.

Leider kann die entsprechende Evaluierungstabelle aufgrund eines Datenverlustes nicht dargestellt werden. Die Beschreibung beruht auf handschriftlichen Aufzeichnungen. Die Dar-

stellung des Modells (Abbildung 38 und Abbildung 43 - links) zeigt ein Rauschen im oberen Bereich der Pflanze. Es wird angenommen, dass in diesem Bereich die maximale Messdistanz überschritten wurde oder unerkannte Störungen die Aufnahmen beeinflussten. Eine Suche eines geeigneteren Standortes war zum damaligen Zeitpunkt aufgrund von technischen und logistischen Problemen nicht möglich.

7.5.2. Aufnahme April 2011

Die Zweite Aufnahme fand am 29.4.2011 im Versuchsgarten Eßling statt. Die Messung beinhaltete 341 Punkte. Die Evaluierung der Umgebung erzielt hier zuverlässigere Werte.

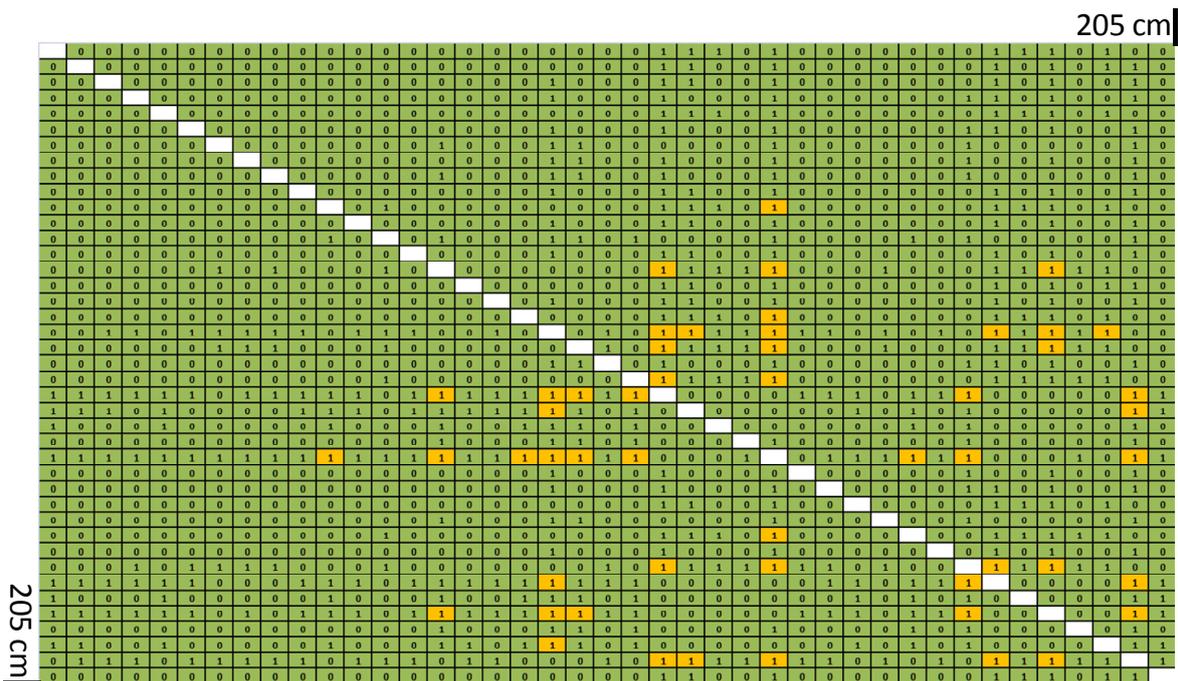


Abbildung 42: Auszug der Umgebungsevaluierung April 2011. Dieser Ausschnitt zeigt die Werte zwischen 0 und 205cm

Abbildung 40 zeigt den Ausschnitt die Messwerte der Umgebungsevaluierung. Gelb sind alle Werte markiert, welche die Grenze von 1 Zentimeter Unterschied zum realen Wert übersteigen.

Auf einer Entfernung von 4 Metern zwischen Transmitter und Receiver blieb die Abweichung des zum realen Wert unter drei Zentimeter. Das Modell scheint auch im optischen Vergleich (Abbildung 39) nur geringe Abweichungen zum tatsächlichen Versuchsobjekt zu besitzen.

7.5.3. Unterschied der Durchmesserklassen

Zur Visualisierung des Zuwachses der Versuchspflanze wurden die Modelle der beiden Aufnahmen einander gegenübergestellt.

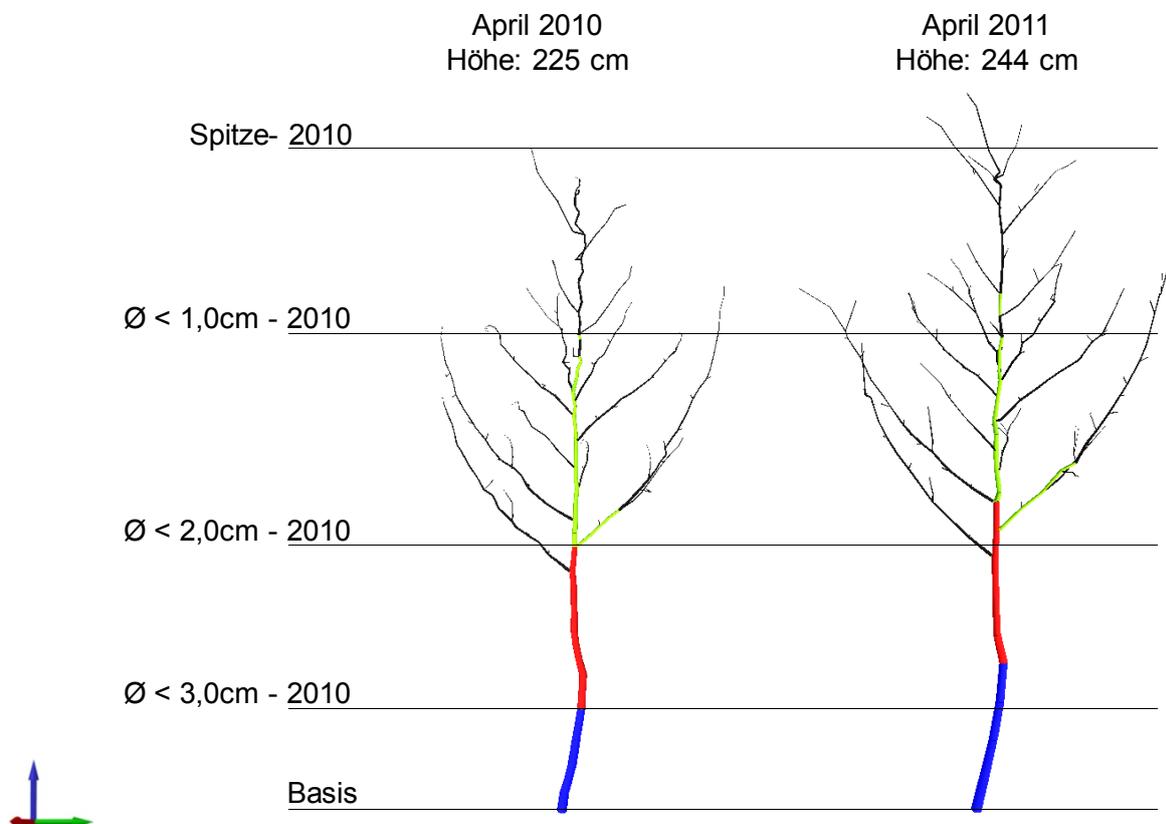


Abbildung 43: Gegenüberstellung der Messungen der Versuchspflanze nach Durchmesserklassen: Aufnahme April 2010 (links) – April 2011 (rechts). Durchmesserklassen: $\varnothing < 1,0\text{ cm}$ – schwarz; $1,0 - 1,9\text{ cm}$ – grün; $2,0\text{ cm} - 2,9\text{ cm}$ – rot und $\varnothing \geq 3,0\text{ cm}$ – blau.

Im Allgemeinen ist neben dem Erscheinungsbild der gesamten Pflanze auch ein deutlicher Unterschied der Durchmesserklassen zwischen den Modellen von 2010 und 2011 zu erkennen. Beispielsweise überschreitet der blaue Bereich ($\varnothing \geq 3,0\text{ cm}$) der Aufnahme von 2011 deutlich denjenigen von 2010. Auch bei Ästen 2. Ordnung ist ein Dickenwachstum feststellbar. Die Ermittlung der Pflanzenhöhe erfolgte manuell. Hierzu wurden jeweils die Koordinaten der Stammbasis und jene der Spitzen herangezogen und die Distanz zwischen den beiden Punkten berechnet. Der Zuwachs betrug 19 Zentimeter.

Auffallend ist jedoch neben geringfügigen Änderungen der Astorientierungen zwischen 2010 und 2011 der sich schlängelnde Bereich an der Spitze der Pflanze (Aufnahme 2010). Dies deutet auf eine Beeinträchtigung der Messwerte aus dem Jahre 2010 hin.

Aus diesem Grund soll hier nochmals die Sensibilität der elektromagnetischen Pflanzenaufnahmemethode auf sichtbare und unsichtbare Störungen erwähnt und die Notwendigkeit einer genauen Umgebungsevaluierung vor der eigentlichen Messung erwähnt werden.

7.5.4. Volumenzuwachs

Neben der Untersuchung des Zuwachses der einzelnen Stamm- und Astdurchmesser wurde auch das jeweilige Volumen der beiden Modelle verglichen. Dies geschah durch Verwendung der in Kapitel 6.2 - Modellerstellung erwähnten Python-Codes.

Die Ergebnisse lauten wie folgt:

	Volumen	Zuwachs
Modell April 2010	910 cm ³	-
Modell April 2011	1040 cm ³	14,29%

Tabelle 10: Volumenzuwachs des Pflanzenmodells zwischen 2010 und 2011

Laut Berechnung ergab sich ein Zuwachs des Pflanzenvolumens innerhalb einer Vegetationsperiode von rund 14%. Dieses Ergebnis ist jedoch mit Vorsicht zu genießen, da eine Evaluierung der Berechnungsmethode auf unzuverlässige Ergebnisse hingewiesen hat.

7.5.4.1. Evaluierung des berechneten Volumens



Abbildung 44: Überlagerung des realen und modellierten Astes

Um die ermittelten Ergebnisse der Volumenberechnung zu überprüfen, wurde ein trockener Ast mit rund 1 Meter Länge einer weiteren Versuchspflanze im Garten des Schwachhöfer-Hauses der Universität für Bodenkultur in 88 Punkten aufgenommen, das Volumen mittels VisuAlea berechnet und mit dem des Astes verglichen.

Die Messung des tatsächlichen Volumens erfolgte mit Hilfe eines Glaszylinders mit bekannter Grundfläche nach dem Archimedischen Prinzip. Der Ast wurde in passende Teile zerschnitten und durch einen Kolben vollständig unter Wasser gedrückt. Durch Veränderung des Wasserpegels im Glaszylinder im unbeeinträchtigten Zustand und bei untergetauchtem Holzstück durch die bekannte Grundfläche des Zylinders konnte das tatsächliche Volumen berechnet werden. Dabei wurde darauf geachtet, die Messung möglichst schnell durchzuführen, damit es aufgrund der Aufnahme von Flüssigkeit durch das trockene Holz zu keiner Beeinträchtigung des Ergebnisses kommt.

Der Vergleich ergab eine Abweichung von 21% des berechneten Wertes mit dem des realen Volumens. Eine Überprüfung des 3d-Modells legt den Schluss nahe, dass Überlappungen der zur Berechnung herangezogenen Zylinder in Knicken und Verästelungsbereichen einen höheren Wert bewirken (vgl. Abbildung 45).

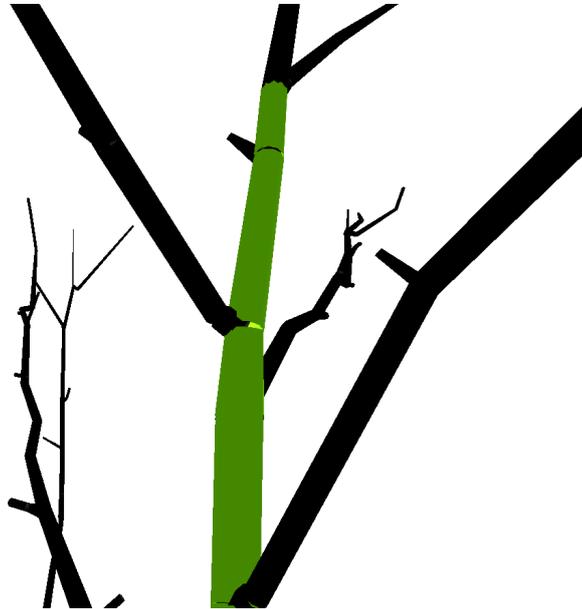


Abbildung 45: Überlappungsbereich der Zylinder

Um diesen Faktor zu beseitigen, wurden die dreidimensionalen Koordinaten in AutoCad eingefügt und zu einem 3d-Modell mit den entsprechenden Durchmessern verbunden. Nach der Vereinigung aller Modellteile zu einem Körper fand eine Überprüfung des Volumens des nicht überlappenden Modells statt. Die Abweichung zum tatsächlichen Ast betrug 14%.

	Volumen	Abweichung
Realer Ast	241 cm ³	0%
VisuAlea	291 cm ³	21%
AutoCAD	274 cm ³	14%

Tabelle 11: Tabelle der berechneten Volumina

Die möglichen Gründe für die Abweichungen lauten:

- Zu hohe Grenzwerte bei der erlaubten Messungenauigkeit
- Einfluss der Messumgebung, da die Aufnahme ebenfalls im Garten des Schwachhöfer- Hauses stattgefunden hat
- Ungenauigkeiten beim Ablesen oder Eintragen der Stammdurchmesser in das Digitalisierungsprogramm

8. Conclusio und Ausblick

Trotz der verschiedenen theoretisch millimetergenauen Aufnahmemethoden ist es nicht möglich ein exaktes 3d-Modell einer Pflanze zu erstellen.

Optische Modellierungsverfahren (Fotografie-basierte Methoden und Laserscanning) sind nach derzeitigem Stand der Technik nicht in der Lage verdeckte Pflanzenteile aufzunehmen. Deshalb werden zur Modellierung Computeralgorithmen verwendet, um eine gute Annäherung an die reale Pflanze zu erzielen.

Mit elektromagnetischen Digitalisierungsinstrumenten hingegen ist es möglich sämtliche Punkte einer Pflanze exakt aufzunehmen und durch die gleichzeitige Erhebung der Topologie auch analytische Werkzeuge zur Beobachtung des Pflanzenwachstums bereitzustellen. Darüber hinaus findet keine Beeinträchtigung der Aufnahme durch Okklusion statt. Allerdings stellen ihre Sensibilität gegenüber der Messumgebung und ihr begrenzter Operationsradius Hindernisse zur Datenerhebung und somit exakten Modellerstellung dar. Diese Effekte können jedoch durch eine genaue Umgebungsevaluierung zum Teil vermindert oder umgangen werden.

Dadurch war es möglich, trotz anfänglicher Schwierigkeiten reproduzierbare und zuverlässige Ergebnisse zu erzielen. Außerdem ist es gelungen sämtliche Nachbearbeitungs- und Modellierungsschritte zu automatisieren. Neben dieser Reduktion von eventuell auftretenden Flüchtigkeitsfehlern ist man somit in der Lage, innerhalb eines Zeitraumes von fünf bis zehn Minuten das visuelle Modell zu erstellen.

Durch die erhobenen Modelle wurde ein Höhenzuwachs von 19 cm, sowie eine Zunahme des Volumens um 14,29% der Versuchspflanze innerhalb einer Vegetationsperiode berechnet. Einer Evaluierung der Methode zur Volumenberechnung zufolge wird dieser Wert allerdings als zu hoch angesehen.

Trotz alledem kann das Ziel dieser Diplomarbeit, die Erstellung eines einfachen virtuellen, dreidimensionalen, geometrischen, oberirdischen Pflanzenmodells einer Eberesche unter Zuhilfenahme eines elektromagnetischen Digitalisierungsinstrumentes als erfüllt betrachtet werden.

Nachdem die bisherigen Arbeitsschritte erfolgreich verlaufen sind, ist es legitim eine Weiterentwicklung in Richtung Pflanzenwachstums- und Belastungsmodelle anzudenken.

Zunächst sollte begonnen werden eine Pflanze mitsamt ihren Blättern zu digitalisieren und die Erstellung des Modelles größtmöglich zu automatisieren. Darüber hinaus könnte man versuchen die Ordnungen der Pflanzenachsen als Einheiten aufzunehmen, beziehungsweise diese nach einer Aufnahme automatisch in Gruppen zu gliedern. Meines Erachtens dürfte somit eine statistische Auswertung der Biomasse nach Astordnungen möglich sein.

Diese statistischen Analysen wären eine gute Ergänzung zu den bereits vollzogenen, visuellen Darstellungen des Pflanzenzuwachses innerhalb einer Vegetationsperiode. Durch wiederholte Aufnahmen mehrerer Pflanzenarten an unterschiedlichen Standorten wäre man in der Lage eine Datenbank zu erstellen, welche als Grundlage für künftige Wachstumsmodelle dient.

VisuAlea bietet derzeit keine mir bekannte Möglichkeit die digitalisierten Modelle nur in bestimmten Höhenbereichen (zum Beispiel: Basis bis 1 m Höhe) anzuzeigen und das entsprechende Volumen zu berechnen. Hier sollte versucht werden, dies durch eine Python Programmierung zu bewerkstelligen oder das Modell in andere zur Analyse geeigneteren Programme zu exportieren.

Nach Voranschreiten der Entwicklung eines Wachstumsmodells, wäre eine Zuweisung statischer Kenngrößen, wie E-Module usw. auf die einzelnen Stamm- und Astdurchmesser denkbar. Dadurch wäre man in der Lage definierte Kräfte auf eine virtuelle Pflanze zu lenken, die Auswirkungen zu beobachten und mit Daten aus der Realität zu vergleichen. Ebenso ist somit die Ermittlung der Belastung auf die Wurzeln einer Pflanze möglich.

Durch die aufgehobene Okklusion bei dieser Aufnahmemethode ist man auch in der Lage Wurzelstöcke zu digitalisieren. Ebenso wie bei den oberirdischen Teilen der Pflanze können auch hier Wachstums- und Belastungsmodelle erstellt werden.

Zur Erreichung dieser ambitionierten Ziele wäre es ratsam, die Hilfe von insbesondere im Umgang mit der Programmiersprache Python erfahrenen Computerprogrammierern heranzuziehen und mit den Entwicklern des Programmes OpenAlea zusammenzuarbeiten.

9. Verzeichnisse

9.1. Literaturverzeichnis

- BARTHÈLÈMY, D., CARAGLIO, Y. (2007): Plant Architecture: A Dynamic, Multilevel and Comprehensive Approach to Plant Form, Structure and Ontogeny. In: *Annals of Botany* (Hrsg.) 99. Oxford University Press. S. 375 – 407.
- BRUNS Pflanzen (Hrsg.) (2007): *Sortimentskatalog 2007/2008*. Überarbeitete Neuauflage. BRUNS Pflanzen-Export GmbH & Co. KG, Bad Zwischenhahn.
- BRYSON, S. (1992): Measurement and calibration of static distortion of position data from 3D trackers. RNR Technical Report RNR-92-011, March 1992. NASA Ames Research Center, Applied Research Branch, Numerical Aerodynamics Simulation Division (Hrsg.), Moffett Field, CA, USA.
- CÔTE, J.-F., WIDLOWSKI, J.-L., FOURNIER, R.A., VERSTRAETE, M.M. (2009): The structural and radiative consistency of three-dimensional tree reconstructions from terrestrial lidar. In: *Remote Sensing of Environment* 113 (2009), Elsevier B.V. Verlag Amsterdam, Niederlande. S. 1067–1081.
- CÔTE, J.-F., FOURNIER, R.A., EGLI, R. (2011): An architectural model of trees to estimate forest structural attributes using terrestrial Lidar. In: *Environmental Modelling & Software* 26 (2011). Elsevier B.V. Verlag Amsterdam, Niederlande. S. 761 – 777.
- DANJON, F., REUBENS, B. (2007): Assessing and analyzing 3D architecture of woody root systems, a review of methods and applications in tree and soil stability, resource acquisition and allocation. In: *Plant and Soil*, vol. 303 (2008). Springer Verlag. S. 1-34.
- DAY, J.S., DUMAS, G.A., MURDOCH, D.J. (1998): Evaluation of a long-range transmitter for use with a magnetic tracking device in motion analysis. In: *Journal of Biomechanics* 31 (1998). Elsevier, S. 957 – 961.
- DAY, J.S., MURDOCH, D.J., DUMAS, G.A. (2000): Calibration of position and angular data from a magnetic tracking device. In: *Journal of Biomechanics*, 33 (2000): Elsevier, S.1039 – 1045.
- DONÈS, N., ADAM, B., SINOQUET, H. (2006): PiafDigit - software to drive a Polhemus Fastrak 3 SPACE 3D digitiser and for the acquisition of plant architecture. Version 1.0. UMR PIAF IN-RA-UBP, Clermont-Ferrand. S. 15ff.
- FLORINETH, F. (2004): *Pflanzen statt Beton*. Handbuch zur Ingenieurbiologie und Vegetationstechnik. Patzer Verlag, Berlin – Hannover.
- GODIN, C., PUECH, O., BOUDON, F., SINOQUET, H. (2004): Space occupation by tree crowns obeys fractals laws: evidence from 3d digitized plants. Short Presentations – Session 2. 4th International Workshop on Functional-Structural Plant Models, 7-11 June 2004 - FSPM04, Montpellier-France, S. 79-83.

- GODIN, C., COSTES, E., SINOQUET, H. (1999): A Method for Describing Plant Architecture which Integrates Topology and Geometry. In: *Annals of Botany* 84, 1999. Zeitschrift der University of Exeter (Hrsg.), Exeter, England. S. 343 – 357.
- GODIN, C., CARAGLIO, Y. (1997): A Multiscale Model of Plant Topological Structures. In: *Journal of Theoretical Biology* 191 (1998), Elsevier, S.1-46.
- HAGEDORN, J.G. (2007): Correction of Location and Orientation Errors in Electromagnetic Motion Tracking. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg
- HILBRANS, H., BARGEL, H.-J., SCHULZE, G. (Hrsg.) (2008): *Werkstoffkunde* (10. Auflage). Springer Verlag, Berlin - Heidelberg
- KANG, S. (2011): Image-Based and Sketch-Based Modeling of Plants and Trees. In: *Computer Vision – ACCV 2010 – Proceeding der 10th Asian Conference on Computer Vision*, Queenstown, New Zealand, November 8-12,2010, Revised Selected Papers Part I. Springer, Berlin/ Heidelberg. S. 350 – 354.
- KINDRATENKO, V.-V. (2000): A survey of electromagnetic position tracker calibration techniques. In: *Virtual Reality: Research, Development and Applications*, 2000, vol.5, no.3., Springer, London. S. 169 – 182.
- von KOCH, H. (1905): Une méthode géométrique élémentaire pour l'étude de certaines questions de la théorie des courbes planes. In. *Acta mathematica*, 30. S. 145-174.
- KUIPERS, J. (1975): United States Patent 3,868,565: Object tracking and Orientation determination means, system and process
- KUIPERS, J. (1977): United States Patent 4,017,858: Apparatus for generating a nutating electromagnetic Field
- KREUZER, J. (1998): *Kreuzers Gartenpflanzen Lexikon*. Bd.1. Laubgehölze, Nadelgehölze – 10. überarb. Auflage. Thalacker Medien, Braunschweig.
- LIU, J., XIAOPENG, Z., HONGJUN, L., DONG, W., PAUL, J.-C. (2010): Sketch-based tree-modeling using depth retrieval. In: *Proceedings der Computer Graphics International 2010*, Nanyang Technological University, Singapur, June 8-11.
- MANDELBROT, B.B. (1982): *The fractal geometry of nature*. W.H. Freeman, San Francisco
- NIXON, M.A., McCALLUM, B.C., FRIGHT, W.R., PRICE, N.B. (1998): The Effects of Metals and Interfering Fields on Electromagnetic Trackers. In: *Presence*, Vol. 7, No.2, April 1998, Massachusetts Institute of Technology. S 204- 218
- NEUBERT, B., FRANKEN, T., DEUSSEN, O. (2007): Approximate Image-Based Tree-Modeling using Particle Flows. In: *SIGGRAPH '07 – Proceeding der Special Interest Group on Computer Graphics and Interactive Techniques Conference*. San Diego, CA, USA. August 05 – 09, 2007. Artikel Nr. 87.
- PFEIFER, N., GORTE, B., WINTERHALDER, D. (2004): Automatic Reconstruction of Single Trees from Terrestrial Laser Scanner Data. In: *Proceeding XXth International Society for Photogrammetry and Remote Sensing - ISPRS Congress*. Istanbul, Türkei, 2004. S. 114 - 119

PFLEGERL, M. (2008): Laserscanning und 3D-Modellierung von ingenieurbioologischen Bauelementen. Diplomarbeit am Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, Universität für Bodenkultur, Wien.

POLHEMUS (2005): 3Space™ Fastrak® User's Manual, Revision E. Polhemus, Colchester, VT.

POLHEMUS (2008): Fastrak: The fast and easy digital tracker. Polhemus, Colchester, VT. (http://www.vrlogic.de/assets/downloads/FASTRAK_Brochure.pdf)

POLHEMUS (o.J.(a)): Fastrak®: Frequently Asked Questions, Polhemus, Colchester, VT. (http://www.polhemus.com/?page=Support_Fastrak_FAQ)

POLHEMUS (o.J.(b.)): Fatsrak®, Polhemus, Colchester, VT. (http://www.polhemus.com/?page=Motion_FASTRAK)

PRADAL, C., DUFOUR-KOWALSKI, S., BOUDON, F., DONES, N. (2007): The architecture of OpenAlea: A visual programming and component based software for plant modeling. In: Proceedings of the 5th International Workshop on Functional Structural Plant Models 4-9 November 2007 - FSPM07 . Napier, Neuseeland. S. 25-1- 25-4.

PRADAL, C., DUFOUR-KOWALSKI, S., BOUDON, F., FOURNIER, C. (2008): OpenAlea: A visual programming and component-based software platform for plant modeling. In: Functional Plant Biology, Nr. 35, S.751-760. (<http://www-sop.inria.fr/virtualplants/Publications/2008/PDBFG08a>)

PRADAL, C., BOUDON, F., NOUGIER, C., CHOPARD, J., GODIN, C. (2009): PlantGL: A Python-based geometric library 3D plant modeling at different scales. In: Geographical Models 71 (2009). Elsevier B.V. Verlag Amsterdam, Niederlande. S. 1 – 21.

PREUKSAKARN, C., BOUDON, F., FERRARO, P., DURAND, J.B., NIKINMAA, E., GODIN, C. (2010): Reconstructing Plant Architecture from 3D Laser scanned data. In: 6th International Workshop on Functional-Structural Plant Models, September 12-17, 2010 – FSPM2010, Davis, University of California, S. 14-16.

PRUSINKIEWICZ, P., LINDENMAYER, A., HANAN, J.S., FRACCHIA, F.D., FOWLER, D., De BOER, M.J.M., MERCER, L. (2004): The Algorithmic Beauty of Plants. Electronic Version. Springer Verlag, New York

PRUSINKIEWICZ, P., KARWOWSKI, R., LANE, B. (2007): The L+C plant modelling language. In: Functional-Structural Plant Modelling in Crop Production. Chapter 3. VOS, J. et al. (Hrsg.). Springer Verlag, 2007.

PRUSINKIEWICZ, P., SHIRMOHAMMADI, M., SAMAVATI, F. (2010): L-systems in Geometric Modeling. In: Electronic Proceedings in Theoretical Computer Science (Hrsg.) Vol. 31 – EPCTS 31: Proceedings Twelfth Annual Workshop on Descriptive Complexity of Formal Systems (DCFS 2010). Saskatoon, Canada – August 8 – 10, 2010.

QUAN, L., WANG, J., TAN, P., YUAN, L. (2006): Image-based plant modeling. In: SIGGRAPH '06 – Proceeding der Special Interest Group on Computer Graphics and Interactive Techniques Conference. Boston, Massachusetts, USA. July 30 – August 3, 2006, ACM Verlag, New York, NY. S. 599 – 604.

RAAB F.H., BLOOD, E.B., STEINER, T.O. JONES, H.R. (1979): Magnetic Position and Orientation Tracking System. In: IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems Vol. AES-15, No.5. 1979, S. 709-718.

RECHE, A., MARTIN, I., DRETTAKIS, G.:(2004): Volumetric Reconstruction and Interactive Rendering of Trees from Photographs. In: SIGGRAPH '04 – Proceeding der Special Interest Group on Computer Graphics and Interactive Techniques Conference. Los Angeles, Kalifornien, USA. August 10 – 12, 2004, ACM, New York, NY. S. 720 – 727.

REMONDINO, F. (2011): Heritage recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning. In: Remote Sensing, 2011, Vol. 3(6). MDPI AG, Basel, Schweiz. S. 1104 – 1138.

SCHLÜTER, U. (1996): Pflanze als Baustoff. Ingenieurbiologie in Praxis und Umwelt. 2. Überarbeitete Auflage. Patzer Verlag, Berlin – Hannover.

SINOQUET, H., ADAM, B., DONÈS, N. (o.J.): Méthodes de mesure de la structure 3D des arbres. Präsentation. UMR PIAF INRA-UBP, Clermont-Ferrand.
(<http://www.inra.fr/internet/Projets/agroBI/PLANTVIRT/6.Sinoquet.ppt>).

SINOQUET, H., THANISAWANYANGKURA, S., MABROUK, H., KASEMAP, P. (1998): Characterization of the Light Environment in Canopies Using 3d Digitising and Image Processing. In: Annals of Botany 82, S. 203-212.

SINOQUET, H., RIVET, P. (1996): Measurement and visualization of the architecture of an adult tree based on a three-dimensional digitising device. In: Trees 11 (1997). Springer Verlag, S. 265-270.

SINOQUET, H., RIVET, P., GODIN, C. (1997): Assessment of the Three-dimensional Architecture of Walnut Trees Using Digitising. In: Silva Fennica 31(3). The Finnish Society of Forest Science and The Finnish Forest Research Institute (Hrsg.), S. 265 – 273.

STAMPA, A. (1999): Grundlagen der Physik II. Elektromagnetismus. Vorlesungsskript der Universität GH Essen

STRAUSS, G. (2004): Grundlagen der Elektrotechnik. Lehrbuch des IKA – Ingenieur Kolleg Automatisierungstechnik (Hrsg.), Reutte.

TAN, P., ZENG, G., WANG, J., KANG, S.B., QUAN, L. (2007): Image-based Tree Modeling. In: SIGGRAPH '07 – Proceeding der Special Interest Group on Computer Graphics and Interactive Techniques Conference. San Diego, CA, USA – August 05 – 09, 2007. Artikel Nr. 87

TENG, C.H., CHEN, Y.S. (2009): Image-Based tree modeling from a few images with very narrow viewing range. In: The Visual Computer Vol. 25. Springer Verlag, Berlin – Heidelberg

TEOBALDELLI, M., PUIG, A.D., ZENONE, T., MATTEUCCI, M., SEUFERT, G., SEQUEIRA, V. (2007): Building a topological and geometrical model of poplar tree using portable on-ground scanning LIDAR. In: Functional Plant Biology 35. CSIRO Publishing, Collingwood, Victoria, Australien. S. 1080 – 1090.

THANISAWANYANGKURA, S., SINOQUET, H., RIVET, P., CRETENET, M., JALLAS, E. (1997): Leaf orientation and sunlit leaf area distribution in cotton. In: Agricultural and Forest Meteorology 86 (1997). Elsevier B.V. Verlag Amsterdam, Niederlande. S. 1 – 15.

WATANABE, T., HANAN, J.S., ROOM, P.M., HASEGAWA, T., NAKAGAWA, H., TAKAHASHI, W. (2005): Rice Morphogenesis and Plant Architecture: Measurement, Specification and the Reconstruction of Structural Development by 3d Architectural Modelling. In: Annals of Botany 95, S. 1131-1143.

XU, H., GOSSET, N., CHEN, B. (2007): Knowledge and Heuristic Based Modeling of Laser-Scanned Trees. In: Association for Computing Machinery (ACM) - Transactions on Graphics (TOG) Volume 26, Issue 4, Artikel 19. Oktober 2007. New York, NY, USA. S. 1 – 19.

ZEH, H. (2007): Ingenieurbiologie. Handbuch Bautypen. Vdf Hochschulverlag, Zürich.

9.2. Internetquellen

SINOQUET, H., ADAM, B., DONÈS, N. (o.J.): Méthodes de mesure de la structure 3D des arbres. Präsentation. UMR PIAF INRA-UBP, Clermont-Ferrand.
<http://www.inra.fr/internet/Projets/agroBI/PLANTVIRT/6.Sinoquet.ppt>
(Letzter Aufruf: 17. September 2012)

9.3. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Größe des aufzunehmenden Objektes aufgrund der verschiedenen Aufnahmemethoden _____	35
Tabelle 2: Effekt der Messumgebung auf die diversen Aufnahmemethoden _____	36
Tabelle 3: Benötigte Zeit für Aufbau und Messung x Anzahl der benötigten Personen ____	37
Tabelle 4: Beeinträchtigung durch Okklusion _____	38
Tabelle 5: Benötigte Zeit für die Modellierung _____	38
Tabelle 6: Genauigkeitsbereich der Methoden _____	39
Tabelle 7: Auftretende Datenmengen _____	39
Tabelle 8: Gegenüberstellung sämtlicher Methoden anhand der angeführten Kategorien	40
Tabelle 9: Zeitaufwand einer Pflanzendigitalisierung samt Modellerstellung _____	65
Tabelle 10: Volumenzuwachs des Pflanzenmodells zwischen 2010 und 2011 _____	76
Tabelle 11: Tabelle der berechneten Volumina _____	77
Tabelle 12: Änderung der Koordinaten aufgrund eines Überganges in eine andere Messhemisphäre _____	104
Table 13: Comparison of the described methods _____	144
Table 14: Duration of the different processes _____	146
Table 15: Increase of volume between 2010 and 2011 _____	156
Table 16: Comparison of different calculation methods _____	157

9.4. Formelverzeichnis

Formel 1: Matrizenschreibweise der Drehungsreihenfolge des Fastrak (vgl. POLHEMUS, 2007, S. C-1) _____	57
Formel 2 :Multiplikationsmatrix der Drehungsmatrizen aus Formel 1 _____	57
Formel 3: Beispiel einer Transformation der x-Koordinate eines gemessenen Wertes ____	57
Formel 4: Umgekehrte Matrizenreihenfolge zur Wiederherstellung der Ausgangskoordinatensysteme _____	58
Formel 5: Multiplikationsmatrix der Drehungsmatrizen aus Formel 4 _____	58
Formel 6: Rotationsmatrizen der 3d-Turtle _____	99

9.5. Abbildungsverzeichnis

Sofern nicht anders angegeben, wurden sämtliche Grafiken vom Autor erstellt.

- Abbildung 1: Schematische Darstellung der Astordnungen: braun – Achse 1. Ordnung (Stamm); grün – Achse 2. Ordnung; schwarz – Achse 3. Ordnung _____ 17
- Abbildung 2: Anordnung von Nodien, Internodien, Trieben und Blättern einer Pflanze (verändert nach GODIN, CARAGLIO, 1997, S.4). _____ 18
- Abbildung 3: Wachstum eines Astes: Bereits bestehende Strukturen werden nicht durch später entwickelte Elemente unterbrochen. GU=Growth unit (Wachstumseinheit); t= Zeitpunkt 0; t+1: 1. Folgejahr; t+2: 2. Folgejahr (GODIN, CARAGLIO, 1997, S.8). _____ 19
- Abbildung 4: Modulare Anordnungen abhängig von der Zeit und dem Betrachtungsmaßstab: a) am Ende einer Vegetationsperiode (1. Jahr); b) im Laufe der Vegetationsperiode (2. Jahr); c) am Ende der Vegetationsperiode (2. Jahr). _____ 20
- Abbildung 5: Modulüberlappung: Aus einer Knospe bildet sich innerhalb einer Vegetationsperiode eine weitere Achse – der jährliche Zuwachs (Jahrestrieb) ist somit Teil von zwei Achsen. Verändert nach GODIN, CARAGLIO (1997, S.8). _____ 21
- Abbildung 6: Änderung der Topologie durch Konkurrenzwachstum: Während Achse B zu den Zeitpunkten 1 und 2 einen Ast 2. Ordnung darstellt, übernimmt sie zum Zeitpunkt 3 die Rolle des Stammes. Der ehemalige Stamm wird ein Ast 2. Ordnung (B') verändert nach GODIN, CARAGLIO (1997, S.11). ____ 21
- Abbildung 7: Grafische und codierte Darstellung der Topologie eines Astes. Die Messung beginnt an der Basis und endet an der Spitze des Astes. < bezeichnet eine Folgebeziehung; + bezeichnet eine axiale Beziehung (der nächste Messpunkt befindet sich auf einer Achse höherer Ordnung) _____ 22
- Abbildung 8: Parameter des Kegelstumpfes, sowie deren Lage im Raum. _____ 23
- Abbildung 9: Textliche und grafische Darstellung eines L-Systems; rechts: die Weiterentwicklung zweier Elemente 'a' und 'b' – Element 'b' entwickelt sich zu einem Element 'a', während Element 'a' zu 'ab' wird; links: 1d-Darstellung des Wachstums von *Anabaena catenula* nach einem ähnlichen Prinzip (PRUSINKIEWICZ, P. et al, 2004, S.4 und 5) _____ 24
- Abbildung 10: Definition der Euler-Winkel _____ 24
- Abbildung 11: Grau-Bild eines Laser Scans: Die verschiedenen Grautöne stehen für Tiefenwerte der Bildpunkte (PFLEGERL, 2008, S. 51). _____ 27
- Abbildung 12: Lageplan von 7 Aufstellungen mit 7 verschiedenen Koordinatensystemen um das Messobjekt (PFLEGERL, M., 2008, S.44). _____ 28
- Abbildung 13: Aufnahmeprinzip eines elektromagnetischen (abgekürzt EM) Digitalisierungsinstruments _____ 31
- Abbildung 14: Fastrak Long-Ranger. _____ 43

Abbildung 15: Fastrak Short-Ranger.	44
Abbildung 16: Fastrak Stylus	44
Abbildung 17: Fastrak SEU.	44
Abbildung 18: Darstellung der Mess-Hemisphäre	45
Abbildung 19: Ergebnis einer Überschreitung der Messhemisphäre: Zwischen der zweiten und dritten Messung wird die eingestellte X-Hemisphäre überschritten und bewirkt ein Umspringen der Vorzeichen der Y- und Z-Koordinaten.	46
Abbildung 20: Eine Mehrfachmessung desselben Punktes aus unterschiedlichen Richtungen kann eine Abweichung in den Abstandswerten zur Messspitze anzeigen	47
Abbildung 21: Grafisches Ergebnis der Umgebungsevaluierung	49
Abbildung 22: Abweichung der Messergebnisse mit steigendem Abstand zum Senderursprung (Angaben in cm)	49
Abbildung 23: Die Programmoberfläche (GUI) von PiafDigit – Links: Vorschau der aufgenommenen Pflanze; Mitte: Übersicht über die Topologie; Rechts: Koordinaten, Euler-Winkel und Pflanzendurchmesser der einzelnen Messpunkte in tabellarischer Form	50
Abbildung 24: Auswirkung einer Messung welche nicht im rechten Winkel durchgeführt wurde	53
Abbildung 25: Aufnahme der Versuchspflanze Sorbus aucuparia im Versuchsgarten Essling im Mai 2011	53
Abbildung 26: Unterschied in der Lage der Ursprungspunkte der Äste 2. Ordnung (grün) entlang der Äste 1. Ordnung (braun): a) Lage an der Oberfläche; b) Lage auf der Achse des Astes 1. Ordnung	54
Abbildung 27: Definition der Koordinatensysteme	55
Abbildung 28: Grafische Darstellung der Koordinatentransformation: a) Punkt in Ausgangslage (Punkt liegt an der Oberfläche); b) Drehung des individuellen Koordinatensystems eines Messpunktes in das Referenzkoordinatensystem	55
Abbildung 29: Grafische Darstellung der Koordinatentransformation: c) Hinzufügen des halben Stammdurchmessers in Xref-Richtung (Punkt liegt auf der Stammachse); d) Zurückdrehen des Koordinatensystems in die Ausgangslage	56
Abbildung 30: Stylus – Definition der Euler'schen Winkel	56
Abbildung 31: Achsdefinition des Stylus	57
Abbildung 32: Hauptbeteiligte Institute an OpenAlea	59

Abbildung 33: VisuAlea GUI:(1) die grafische Programmieroberfläche; (2) Übersicht über die verwendbaren Programmkomponenten – Package manager; (3) Widgets und Widget-Fenster; (4) Python-Interpreter; (5) 3d-Viewer. _____	61
Abbildung 34: Darstellung des Ergebnisses der visuellen Programmierung in VisuAlea. Durch Ausführen des Widgets “plant_frame“ (unten links) wird das 3d Modell der Pflanze dargestellt, automatisch das Volumen berechnet und im Python-Interpreter ausgegeben. _____	63
Abbildung 35: VisuAlea Programm zur Darstellung des Pflanzenmodells. _____	66
Abbildung 36: Darstellung der virtuellen Versuchspflanze aus verschiedenen Perspektiven _____	67
Abbildung 37: Darstellung der Eberesche mit unterschiedlich eingefärbten Ast-Ordnungen – Grün: Stamm (1. Ordnung); Magenta: Äste 2. Ordnung; Cyan: Äste 3. Ordnung _____	68
Abbildung 38: Vergleich von Aufnahmen mit unterschiedlichem Genauigkeitsgrad; links: grobe Aufnahme mit 47 Messpunkten; rechts: Aufnahme mit 350 Messpunkten _____	69
Abbildung 39: Optischer Vergleich der virtuellen Pflanze (oben links) mit dem Original (oben rechts), sowie eine Überlagerung der Bilder (unten) – Aufnahme April 2011 _____	70
Abbildung 40: VisuAlea Programmierung zur Errechnung des Volumens unter gleichzeitiger Darstellung des Modells mit unterschiedlich eingefärbten Durchmesserklassen und automatischer Legendenerstellung. _____	72
Abbildung 41: Ergebnis nach Ausführung des Dataflows von Abbildung 40: Darstellung der Sorbus aucuparia mit unterschiedlich eingefärbten Stamm/-Astdurchmessern mit entsprechender Legende. Aufgrund der Programmstruktur werden die Farben nur als RGB-Zahlenwert ausgegeben. _____	73
Abbildung 42: Auszug der Umgebungsevaluierung April 2011. Dieser Ausschnitt zeigt die Werte zwischen 0 und 205cm _____	74
Abbildung 43: Gegenüberstellung der Messungen der Versuchspflanze nach Durchmesserklassen: Aufnahme April 2010 (links) – April 2011 (rechts). Durchmesserklassen: $\emptyset < 1,0$ cm – schwarz; 1,0 – 1,9 cm– grün; 2,0 cm – 2,9 cm – rot und $\emptyset \geq 3,0$ cm – blau. _____	75
Abbildung 44: Überlagerung des realen und modellierten Astes _____	76
Abbildung 45: Überlappungsbereich der Zylinder _____	77
Abbildung 46: Unterschied der Entwicklungsstufen zwischen den anfänglichen L-Systemen (links) und der weiterentwickelten Modellierungssprache (rechts) (PRUSINKIEWICZ, KARWOWSKI, LANE, 2007, S.28) _____	95
Abbildung 47: Erstellung einer Schneeflocke mit einem Dreieck als Ausgangsform durch überschreibende Systeme (PRUSINKIEWICZ, P. et al, 2004, S.2) _____	96

Abbildung 48: Textliche und grafische Darstellung (1d-Darstellung des Wachstum von Anabaena catenula) eines DOL-Systems (PRUSINKIEWICZ et al., 2004, S.4 und S.5)	97
Abbildung 49: Einfache Zeichnung einer Turtle aufgrund entsprechender Befehle (PRUSINKIEWICZ et al., 2004, S.7)	98
Abbildung 50: Quadratische Koch-Inseln; L-System adaptierte Turtle-Grafiken: (a) Ausgangsform – Axiom; (b – d) adaptiertes Axiom nach n Stufen (PRUSINKIEWICZ et al., 2004, S.8)	98
Abbildung 51: Darstellung einer 3d-Turtle Grafik (PRUSINKIEWICZ et al., 2004, S.20)	99
Abbildung 52: Entwicklung der Topologie einer Pflanze (PRUSINKIEWICZ et al., 2004, S.23)	100
Abbildung 53: Virtuuell erstellte Pflanze (PRUSINKIEWICZ et al., 2004, S.26)	100
Abbildung 54: Systeminterne Festlegung der Hemisphären	104
Abbildung 55: Achsdefinition des Stylus	105
Abbildung 56: Wählen des Widges “int“ im package manager	107
Abbildung 57: Widgets auf der grafischen Programmieroberfläche	107
Abbildung 58: Hinzufügen von weiteren Programmierschritten	108
Abbildung 59: Verbinden der einzelnen Schritte durch Dataflows	108
Abbildung 60: Einstellen der gewünschten Werte	109
Abbildung 61: Ausführen des Skripts durch betätigen von “Run“	109
Abbildung 62: Gruppieren von Programmschritten	110
Abbildung 63: Ergebnis nach hinzufügen, einstellen und verbinden der restlichen Widgets	110
Figure 64: Schematic representation of the axes-orders. Brown – 1 st order (stem); green – 2 nd order; black – 3 rd order.	136
Figure 65: Connections of Nodes, Internodes, Shoots, Buds and Leaves (changed after GODIN, CARAGLIO, 1997, p.4).	137
Figure 66: Euler angle - Definitions	138
Figure 67: Principle of an electromagnetic digitizer	140
Figure 68: VisuAlea GUI (1); Package manager (2); Widgets (3) Python-Interpreter (4); 3d-Viewer (5).	145
Figure 69: VisuAlea dataflow to visualize the plant model	147
Figure 70: Three-dimensional model, viewed from different perspectives	148

Figure 71: Plant model depicting the different orders – Green: Stem (Axis 1 st order); Magenta: 2 nd order branches; Cyan: 3 rd order branches _____	149
Figure 72: Comparison of different levels of accuracy; left: coarse measurement, 47 records; right: exact measurement, 350 records _____	150
Figure 73: Optical comparison between the virtual and the real plant – Measurement: April 2011 _____	151
Figure 74: VisuAlea dataflow to calculate the plant's volume, show the different diameter classes in specific colors and creating a legend _____	152
Figure 75: Result after activating the dataflow: Specific colored classification of the stem diameters including the color-code description using RGB-values _____	153
Figure 76: Excerpt of the environmental evaluation, measurement 2011 _____	154
Figure 77: Side-by-side comparison of the two measurements (April 2010-left and April 2011-right). Diameter-classification: $\emptyset < 1,0$ cm – black; 1,0 – 1,9 cm– green; 2,0 cm – 2,9 cm – red and $\emptyset \geq 3,0$ cm – blue. _____	155
Figure 78: Overlay: Virtual and real branch _____	156
Figure 79: Overlapping cone-frustums _____	157

A. Anhang

A - 1. Details zur Beschreibung der L-Systeme

Die L-Systeme, die am Anfang noch zur Beschreibung von relativ einfachen multizellulären Organismen und deren Topologie verwendet worden sind, entwickelten sich weiter, um immer detailreichere Visualisierungen und Entwicklungsmodelle zu erstellen.

Da in der Literatur häufig Bezug auf diese Form der programmierten Pflanzenerstellung genommen wird, können sie als Grundstein der algorithmusbasierten Beschreibung von Pflanzen angesehen werden. Sie bedienen sich dabei der Selbst-Gleichheit (self-similarity), also dem Prinzip immer wieder kehrender Strukturen von Körper und Flächen unabhängig des Betrachtungsmaßstabs (vgl. MANDELBROT, 1982, S.34; PRUSINKIEWICZ et al., 2004, S.v ff).

Insbesondere durch die Entwicklung von anderen Programmiersprachen wurde dieses System erweitert. So berichten PRUSINKIEWICZ, KARWOWSKI und LANE über die Implementierung der Computersprache C++ in den L-System-Formalismus, um nicht bloß einzelne Module pro Entwicklungsschritt verändern zu können, sondern ganze Pflanzenteile simultan auf dem Bildschirm entwickeln zu lassen (vgl. PRUSINKIEWICZ, KARWOWSKI, LANE, 2007, S.28ff).

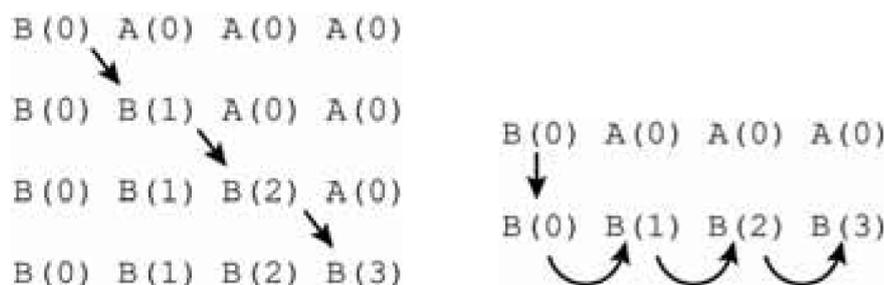


Abbildung 46: Unterschied der Entwicklungsstufen zwischen den anfänglichen L-Systemen (links) und der weiterentwickelten Modellierungssprache (rechts) (PRUSINKIEWICZ, KARWOWSKI, LANE, 2007, S.28)

A - 1.1. Methode der Erstellung und Formalismen

Da eine genaue Beschreibung die diversen Möglichkeiten und Komponenten der L-Systeme den Rahmen dieser Arbeit übersteigt, werden in dem folgendem Kapitel lediglich die groben Strukturen dieser Art der Pflanzenmodellierung behandelt. Genauere Erklärungen, sowie Beschreibungen zusätzlicher Komponenten, wie zum Beispiel die Verwendung von Fraktalen, werden in dem Buch „The Algorithmic Beauty of Plants“ von PRUSINKIEWICZ et al. (2004) geliefert.

Um das Konzept der L-Systeme leichter verstehen zu können, werden zuerst die Grundstrukturen genauer erläutert.

A - 1.2. Überschreibende Systeme (Rewriting systems)

Hierzu werden einfache Objekte (z.B. die Kanten eines Dreiecks) aufgrund einer programmierten Reglementierung durch komplexere Strukturen ersetzt. Durch diesen Austausch der Initiatoren (initiators) durch Generatoren (generators) ist es möglich, anhand von einfachen Regeln kompliziertere Elemente zu beschreiben und zu erstellen. Die folgende Grafik zeigt, wie durch VON KOCH (1905) beschrieben, eine Generierung einer Schneeflocke anhand eines Dreiecks als Ausgangsform durch Befolgung einfacher Regeln (vgl. PRUSINKIEWICZ et al., 2004, S.1f).

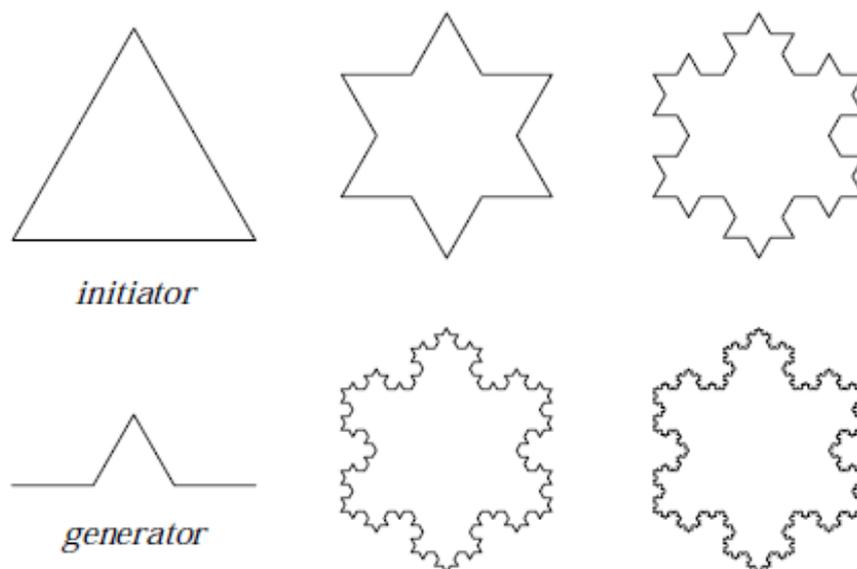


Abbildung 47: Erstellung einer Schneeflocke mit einem Dreieck als Ausgangsform durch überschreibende Systeme (PRUSINKIEWICZ, P. et al, 2004, S.2)

Zu Abbildung 47 (vgl. MANDELBROT, 1982, S.39):

Maßgebend für die Umwandlung sind zwei verschiedene Formen:

- Der **Initiator** ist eine einfache Form. In diesem Fall eine Kante des Dreiecks.
- Der **Generator** ist eine unterbrochene Linie mit N gleich langen Seiten. Die Länge des Generators entspricht der Länge des Initiators.

Ausgehend von der Ursprungsform werden nun in jedem Arbeitsschritt die Initiatoren durch Generatoren ersetzt und die Kanten der vormaligen Generatoren werden zu neuen Initiatoren.

Dieses System wurde im über die Jahre laufend adaptiert und auch auf andere Anwendungsgebiete, wie geometrische Körper umgelegt. 1968 veröffentlichte Arisid Lindenmayer eine neue Form der selbstüberschreibenden Grammatik, welche sämtliche zu ändernden Elemente simultan tauscht (context-free), so genannte L-Systeme.

Eine Grundform der L-Systeme stellen die DOL-Systeme (deterministic-context free-L-systems) (vgl. PRUSINKIEWICZ et al., 2004, S.2f) dar.

DOL-Systeme

Ihr Vorteil liegt in der simultan auf mehrere Elemente anwendbaren Struktur und der somit realistischeren Modellierung von parallelem Zellenwachstum innerhalb einer Pflanze (vgl. PRUSINKIEWICZ et al., 2004, S.3f).

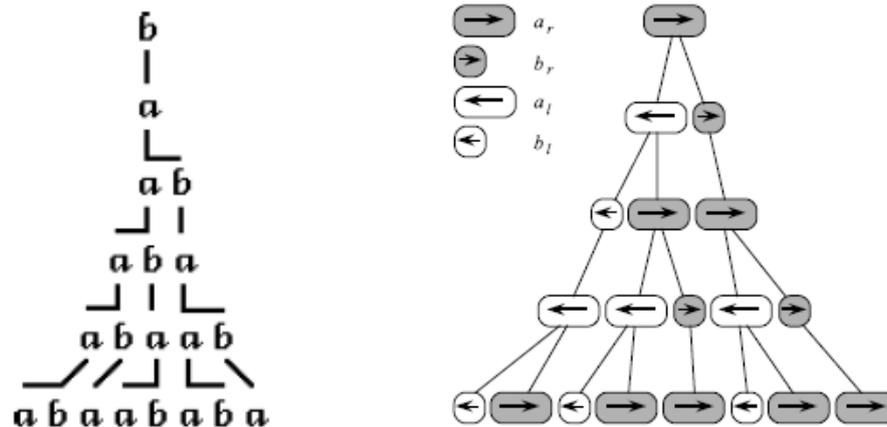


Abbildung 48: Textliche und grafische Darstellung (1d-Darstellung des Wachstum von *Anabaena catenula*) eines DOL-Systems (PRUSINKIEWICZ et al., 2004, S.4 und S.5)

Im dargestellten System der Abbildung 48 existieren 2 Regeln (vgl. PRUSINKIEWICZ et al., 2004, S.3):

- Ein Element **a** wird durch die Elemente **a und b** ersetzt
- Ein Element **b** wird durch das Element **a** ersetzt

Wie im obigen Bild erkennbar ist mit Hilfe der DOL-System Reglementierung bereits nach wenigen Schritten ein Wachstum des Initial-Elementes (Axiom) zu sehen. Diesem Wachstum ist lediglich durch Angabe der zu vollführenden Schritte eine Grenze gesetzt. Dieses System kann bereits zur Darstellung des Wachstums von einfachen Pflanzen (hier das Filament *Anabaena catenula*) angewendet werden (vgl. PRUSINKIEWICZ et al., 2004, S.3f).

TURTLE-Interpretation

Vereinfacht gesagt ist eine Turtle ein virtueller Zeichenstift, der sich aufgrund von Befehlen bewegt und dreht.

Folgende Grafik zeigt ein einfaches Bild einer Turtle, wobei folgende Regeln gelten (vgl. PRUSINKIEWICZ et al., 2004, S.6f):

- F Bewegung nach vorne
- f Bewegung nach vorne ohne einen Strich zu zeichnen
- + Drehung nach links um 90°
- Drehung nach rechts um 90°
- [Speichern der aktuellen Informationen (Lage, Winkel,...)
-] Abrufen der gespeicherten Informationen

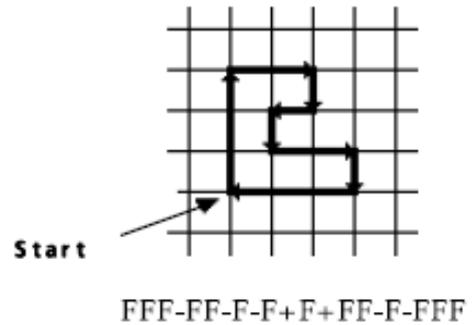


Abbildung 49: Einfache Zeichnung einer Turtle aufgrund entsprechender Befehle (PRUSINKIEWICZ et al., 2004, S.7)

Adaptiert durch die "Überschreibenden Systeme", welche in Kapitel A - 1.2 Überschreibende Systeme (Rewriting systems) genauer beschrieben werden, ist man in der Lage mit einfachen Regeln komplexe Muster zu erstellen.

Folgende Grafiken zeigen die Adaptierung eines Quadrates mit Hilfe von selbstüberschreibenden Systemen, wobei gilt (vgl. PRUSINKIEWICZ et al., 2004, S.8):

Axiom w: $F - F - F - F$
 Produktion p: $F \rightarrow F - F + F + FF - F - F + F$

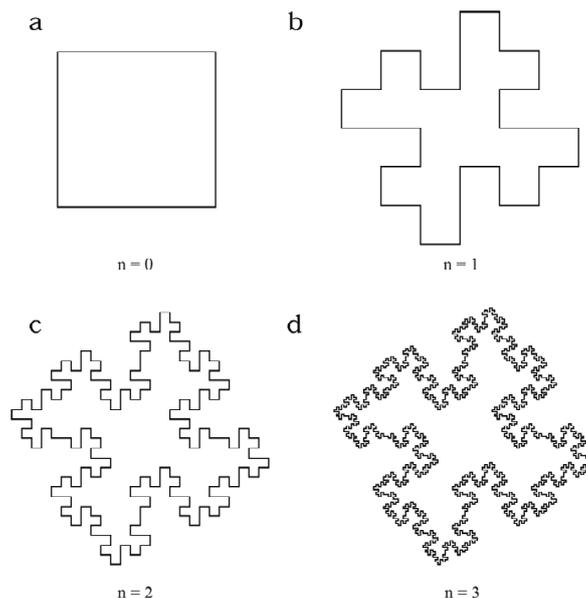


Abbildung 50: Quadratische Koch-Inseln; L-System adaptierte Turtle-Grafiken: (a) Ausgangsform – Axiom; (b – d) adaptiertes Axiom nach n Stufen (PRUSINKIEWICZ et al., 2004, S.8)

Als Weiterentwicklung der 2D-Grafiken wurde der Turtle-Interpretation die dritte Dimension hinzugefügt. Um sich frei im 3d-Raum bewegen zu können benötigt man jedoch weitere Befehle und Regeln.

Die 3d-Regeln lauten wie folgt (vgl. PRUSINKIEWICZ et al., 2004, S.19):

- + Drehung nach links um den Winkel δ , unter Verwendung der Rotationsmatrix $R_U(\delta)$
- Drehung nach rechts um den Winkel δ , unter Verwendung der Rotationsmatrix $R_U(-\delta)$
- & Neigung nach unten um den Winkel δ , unter Verwendung der Rotationsmatrix $R_L(\delta)$
- ^ Neigung nach oben um den Winkel δ , unter Verwendung der Rotationsmatrix $R_L(-\delta)$
- \ Rollen nach links um den Winkel δ , unter Verwendung der Rotationsmatrix $R_H(\delta)$
- / Rollen nach rechts um den Winkel δ , unter Verwendung der Rotationsmatrix $R_H(-\delta)$
- | Umkehrung, unter Verwendung der Rotationsmatrix $R_U(180)$

Ebenso wird hier die Rotation \mathbf{R} eingeführt, die sich aus drei 3x3 Rotationsmatrizen ergibt:

$$R_U(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$R_L(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{pmatrix}$$

$$R_H(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}$$

Formel 6: Rotationsmatrizen der 3d-Turtle

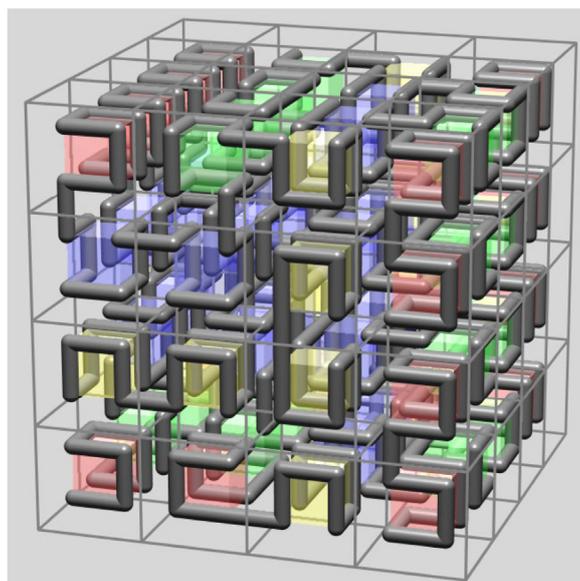


Abbildung 51: Darstellung einer 3d-Turtle Grafik (PRUSINKIEWICZ et al., 2004, S.20)

Darstellung von höheren Pflanzen

Mit den oben vorgestellten Schritten ist es nun möglich Strukturen (wie z.B. Topologie) und Darstellungen von höheren Pflanzen zu kreieren.

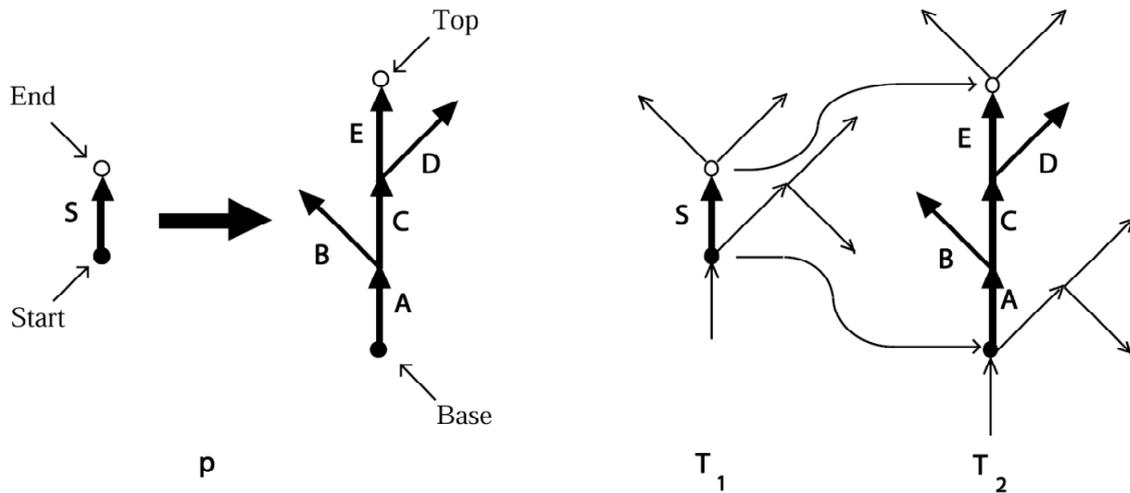


Abbildung 52: Entwicklung der Topologie einer Pflanze (PRUSINKIEWICZ et al., 2004, S.23)



$$n=7, \delta=22.5^\circ$$

- ω : A
- p_1 : A \rightarrow [&FL!A]/////’ [&FL!A]////////’ [&FL!A]
- p_2 : F \rightarrow S ///// F
- p_3 : S \rightarrow F L
- p_4 : L \rightarrow [’ ’ ’ ^{ -f+f+f- | -f+f+f }]

Abbildung 53: Virtuell erstellte Pflanze (PRUSINKIEWICZ et al., 2004, S.26)

Parametrisierte L-Systeme

Da nach den bisher vorgestellten Schritten ausschließlich Pflanzen erstellt werden können, welche in Form und Farbe identisch sind, gilt es hier noch zu erwähnen, dass es ebenso möglich ist entsprechenden Parametern, wie Länge und Winkel, eine Varianz zuzuordnen um eine Diversität der dargestellten Pflanzen sicherzustellen (vgl. PRUSINKIEWICZ et al., 2004, S.40ff).

Diese Methode basiert vor allem auf Parametern, welche häufig durch die Erstellung und Analyse der Modelle anderer Methoden, die reale Pflanzen aufnehmen, gewonnen werden. Sie dienen aber auch gleichzeitig als Hilfe zur Darstellung verdeckter Pflanzenteile, die nicht aufgenommen werden konnten (vgl. NEUBERT, FRANKEN, DEUSSEN, 2007, S.2).

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit eine Pflanze von ihrer zellulären Struktur bis hin zu einem Abbild des gesamten Individuums darzustellen, wobei eine mögliche Exaktheit immer von den erhobenen Parametern, sowie der Genauigkeit des programmierten Algorithmus abhängig ist (vgl. PRUSINKIEWICZ et al., 2004, S.51ff).

Insbesondere aufgrund der Möglichkeit abgerundete und volumetrische Elemente unter Verwendung spezieller Algorithmen und Kurven zu erzeugen, können durch L-Systeme erstellte Modelle realitätsnahe geometrische Pflanzen erstellen (vgl. PRUSINKIEWICZ, SHIRMOHAMMADI, SAMAVATI, 2010, S. 1ff).

A - 2. Spezielle Details zu den Fastrak Konfigurationen

Im Grunde gibt es zwei Möglichkeiten das System an seine Umgebung anzupassen. Erstens eine Kalibrierung über das Windows HyperTerminal Protokoll oder eine Einstellung über das Graphical User Interface (GUI) der Firma Polhemus (vgl. POLHEMUS, 2005, S.1ff).

Es sollte jedoch bedacht werden, dass diese Einstellungen nur bedingte Auswirkungen auf Umgebungseinflüsse haben. Bei extremen Störungen (siehe Kapitel: 3.3.3 Genauigkeit, Auflösung und Fehler) können keine zuverlässigen Ergebnisse erbracht werden.

A - 2.1. Konfiguration via HyperTerminal

Eine Möglichkeit den Fastrak zu kalibrieren ist über das Windows HyperTerminal Protokoll. Hier hat der Operator die Möglichkeit über diverse Befehle mit dem Fastrak zu kommunizieren und gegebenenfalls Justierungen der Einstellungen vorzunehmen (vgl. POLHEMUS, 2005, S.5f).

Für die Digitalisierung einer Pflanze wichtigsten Befehle lauten wie folgt (vgl. POLHEMUS, 2005, S.34ff):

- H – Festlegen der Mess-Hemisphäre - Hemisphere of Operation
- N – Abstand zum Empfänger-Koordinatenursprung - Define Tip Offsets
- O – Daten Output - Output Data List
- T – Internen Funktionstest - Build-In-Test Information
- u – Metrische Einheiten - Metric Conversion Units

H – Festlegen der Mess-Hemisphäre- Hemisphere of Operation

Aufgrund der Symmetrie von elektromagnetischen Feldern gibt es für jede Messung zwei mögliche mathematische Lösungen und somit zwei mögliche Positionen des Empfängers. Mit dem Befehl H kann die Halbkugel der Messung festgelegt werden.

Dies hat zur Folge, dass die gemessenen Koordinaten mit positiven Vorzeichen versehen werden. Bewegt sich der Empfänger auf die Grenze der Messhalbkugel (z.B. die X-Achse) zu, so werden die gemessenen Koordinaten kleiner. Bei einem Überschreiten der Halbkugel ändern sich sämtliche Vorzeichen der Messungen, außer der festgelegten Messhalbkugel (POLHEMUS, 2005, S.47f).

Die folgende Tabelle zeigt einen Übergang der Messwerte bei konstanten Y und Z Koordinaten.

X	Y	Z
3.00	2.00	2.50
1.58	2.00	2.50
0.16	2.00	2.50
Übergang der X-Hemisphäre		
1.26	2.00	-2.50
2.68	2.00	-2.50
4.10	2.00	-2.50

Tabelle 12: Änderung der Koordinaten aufgrund eines Überganges in eine andere Messhemisphäre

Nach Eingabe des Befehls H werden vom FASTRAK die aktuellen Einstellungen an den Computer gesendet. Sie bestehen aus der Nummer des Empfängers, sowie der aktuellen Messhalbkugel.

H1, 1, 0,0<>

Die oben genannte Einstellung zeigt, dass für den Empfänger auf Position 1 (H1) die positive X-Halbkugel als Messbereich ausgewählt ist (vgl. POLHEMUS, 2005, S.48).

Die Einstellungen für die diversen Messbereiche lautet (POLHEMUS, 2005, S.48):

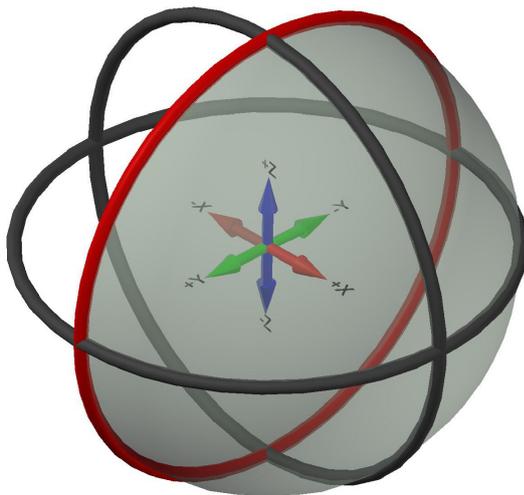


Abbildung 54: Systeminterne Festlegung der Hemisphären

Vordere Hemisphäre (+X)	H1,1,0,0 <>
Hinterere Hemisphäre (-X)	H1,-1,0,0 <>
Rechte Hemisphäre (+Y)	H1,0,1,0 <>
Linke Hemisphäre (-Y)	H1,0,-1,0 <>
Untere Hemisphäre (+Z)	H1,0,0,1 <>
Obere Hemisphäre (-Z)	H1,0,0,-1 <>

H1,0,0,0 aktiviert die Spurverfolgung des Empfängers. Für weitere Informationen, siehe POLHEMUS, 2005, S.47f.

N – Abstand zum Empfänger-Koordinatenursprung - Define Tip Offsets

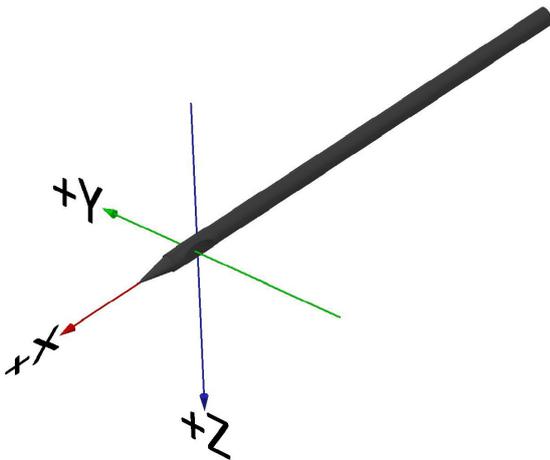


Abbildung 55: Achsdefinition des Stylus

Über den Befehl N kann der Abstand zum Messursprung des Empfängers eingestellt werden. Dieser Befehl ist vor allem von Bedeutung, wenn der aufzunehmende Gegenstand eine konstante Stärke aufweist. So kann durch Einstellung des Abstandes auf die halbe Materialstärke bereits eine Aufnahme der Achse erfolgen, ohne dass die gemessenen Koordinaten transformiert werden müssen (vgl. Kapitel 5.4 Nachbearbeitung - Koordinatentransformation; POLHEMUS, 2005, S.53).

Die Standardeinstellung des Koordinatenursprungs liegt bei **X: 6,438, Y: 0,037, Z: 0,057** und definiert die Spitze des Stiftes.

O – Daten Output - Output Data List

O gibt dem Benutzer die Möglichkeit, je nach Bedarf, bestimmte Messwerte ein oder auszublenken, um die Übersichtlichkeit der Daten zu erhöhen.

Zum Beispiel ist es möglich sich die Relativ- oder Absolutkoordinaten oder, falls benötigt, die Euler-Winkel anzeigen zu lassen (vgl. POLHEMUS, 2005, S.54).

Eine genaue Beschreibung der möglichen Messdaten befindet sich im Polhemus Handbuch auf Seite 54.

T – Interner Funktionstest - Build-In-Test Information

Mit dem internen Funktionstest kann die Funktionalität des Digitizers sichergestellt werden. Durch Eingabe des Buchstaben T wird der Test durchgeführt. Die ausgegebene Alphanumerische Kombination (BIT-Code) verweist auf etwaige Störungen im System (vgl. POLHEMUS, 2005, S.69).

Noch zu erwähnen ist der BIT-Code 'k'. Hier befindet sich der Empfänger außerhalb der Feldreichweite des Senders. Eine Reduktion des Abstandes zwischen den beiden Einheiten beseitigt diesen Fehler.

Falls während einer Messung andere BIT-Codes auftreten, befindet sich im Benutzerhandbuch auf Seite 69 eine umfangreiche Liste mit den möglichen Fehlerursachen.

u – Metrische Einheiten - Metric Conversion Units

Wenn nach einem Neustart des Systems die Messeinheiten auf Zoll umgestellt sein sollten, kann man mit dem Befehl 'u' den FASTRAK auf eine metrische Datenausgabe umstellen (vgl. POLHEMUS, 2005, S.72).

A - 2.2. Konfiguration via Graphical User Interface

Die zweite Möglichkeit der Systemeinstellungen kann durch das Graphical User Interface (GUI) der Firma Polhemus durchgeführt werden. Unter dem Menüpunkt 'Options' können alle der oben genannten Befehle durch de-/aktiveren an das System übermittelt werden. Im Falle eines Auftretens eines möglichen Systemfehlers wird der entsprechende BIT-Code sofort an die entsprechende Messung beigefügt (vgl. POLHEMUS, 2005, S.72).

A - 3. Spezielle Details zu OpenAlea

A - 3.1. Programmieren in VisuAlea

Es folgt eine Erläuterung zum grafischen Programmieren mit VisuAlea. Als Beispiel soll die Rechnung $1+2$ mit späterer Multiplikation mit der Zahl 3 dienen.

Schritt 1

Ziehen des Widgets "int" aus dem Paket "openalea – data structure" auf die Programmieroberfläche

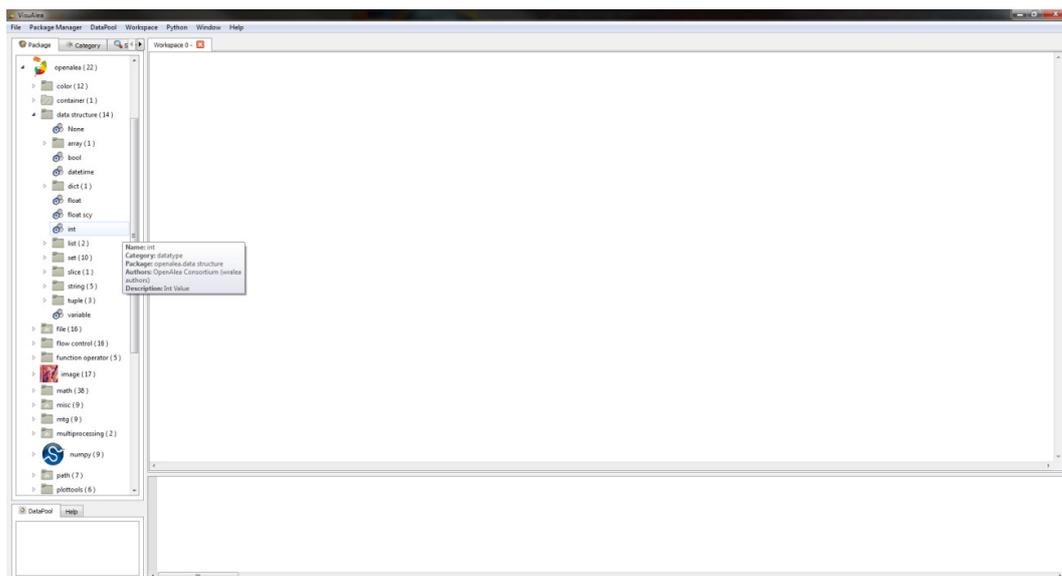


Abbildung 56: Wählen des Widgets "int" im package manager

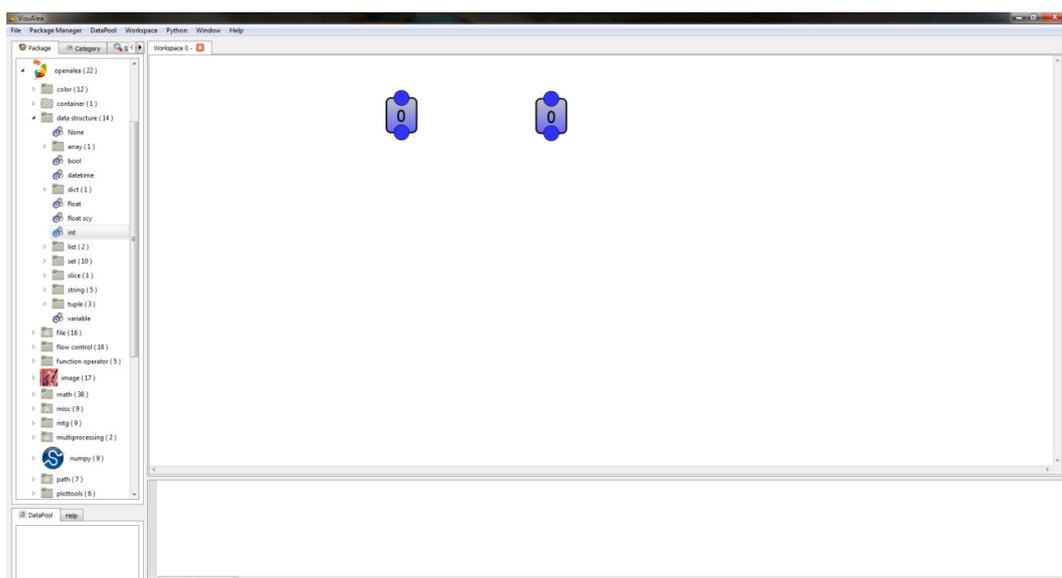


Abbildung 57: Widgets auf der grafischen Programmieroberfläche

Schritt 2

Das Widgets der mathematischen Funktion “+” von “openalea – math” und “print” von “openalea – python method” einfügen



Abbildung 58: Hinzufügen von weiteren Programmierschritten

Schritt 3

Erstellen von Dataflows durch Verbinden der “int” Ausgänge mit jeweils einem Dateingang von “+”, sowie des “+” – Ausgangs mit “print”.

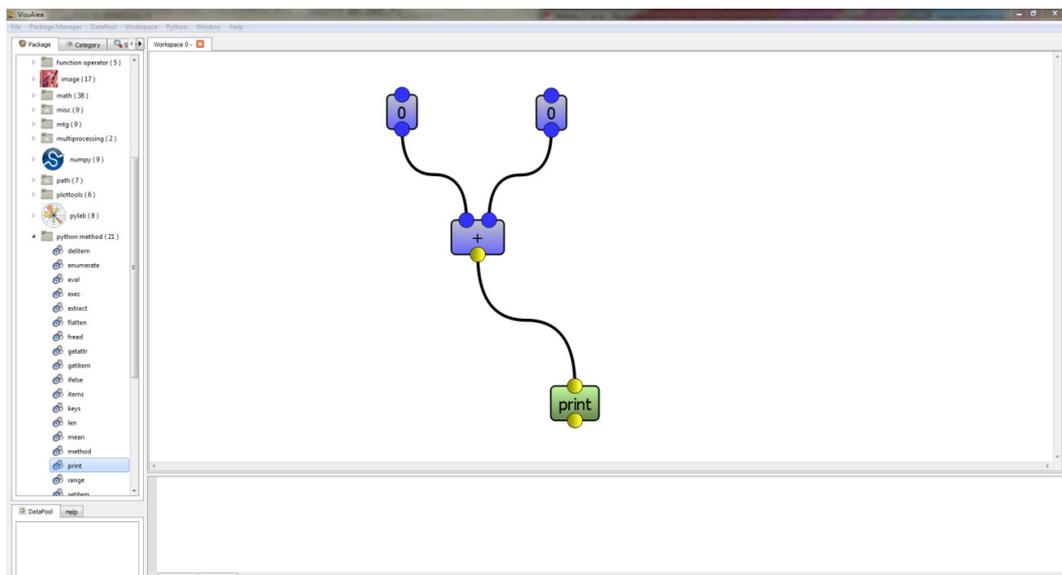


Abbildung 59: Verbinden der einzelnen Schritte durch Dataflows

Schritt 4

Eingeben der Zahlen 1 und 2 in das Widget-Fenster durch Doppelklick auf das entsprechende Widget

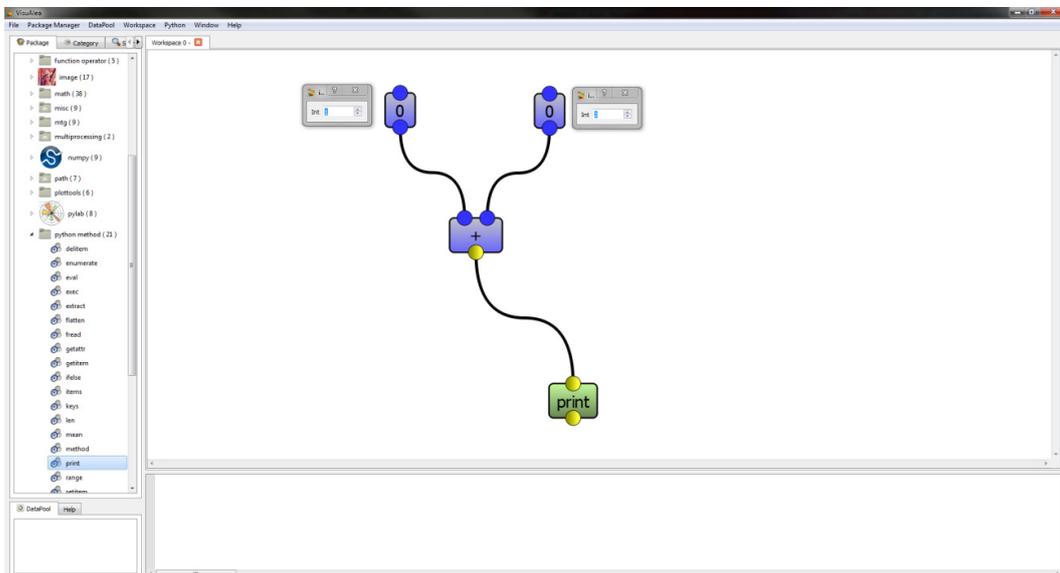


Abbildung 60: Einstellen der gewünschten Werte

Schritt 5

Ausführen des Skripts durch Rechtsklick auf "print" und Betätigen von "Run". Das Ergebnis wird im Python-Interpreter angezeigt.

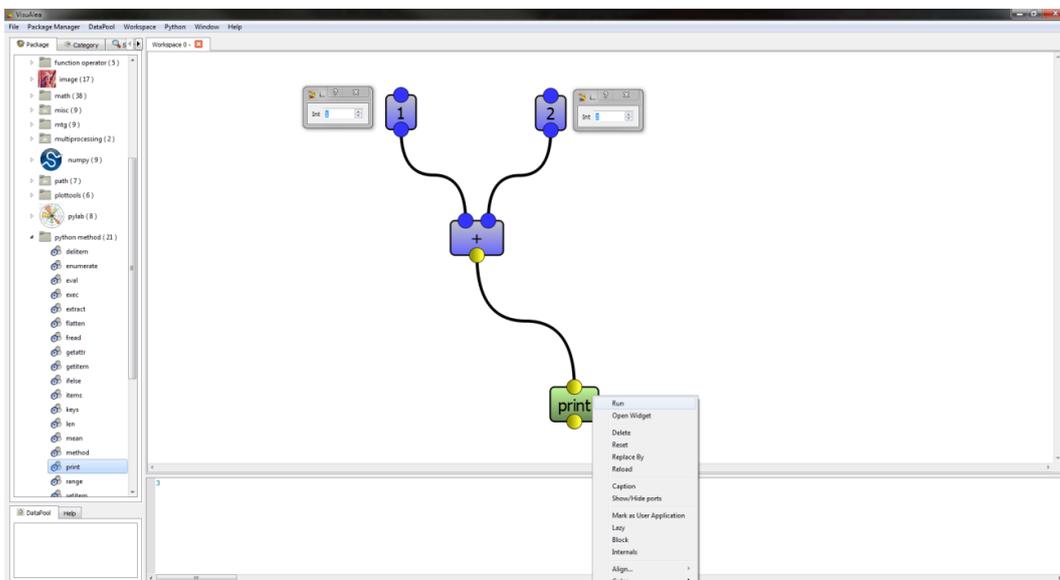


Abbildung 61: Ausführen des Skripts durch betätigen von "Run"

Schritt 6

Optional können die Widgets “1”, “2” und “+“ durch gemeinsames markieren und drücken von Strg +G gruppiert und als ein Element behandelt werden. Dabei wird der Widget-Ausgang jedoch immer den Wert 3 besitzen.

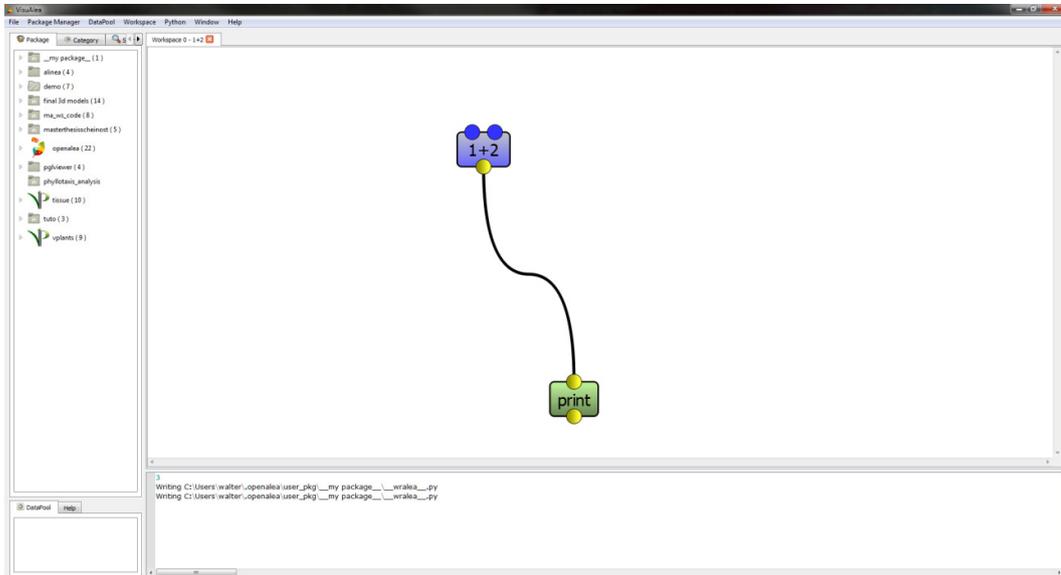


Abbildung 62: Gruppieren von Programmschritten

Schritt 7

Das Skript wird fertiggestellt durch hinzufügen von einem “int“- Widget von “openalea – data structure“ und “*” aus “openalea – math“. Durch modifizieren der Dataflows, der Eingabe des Integers 3 und ausführen von “print“ kann nun das Ergebnis von $(1+2)*3$, nämlich 9, vom Interpreter abgelesen werden.

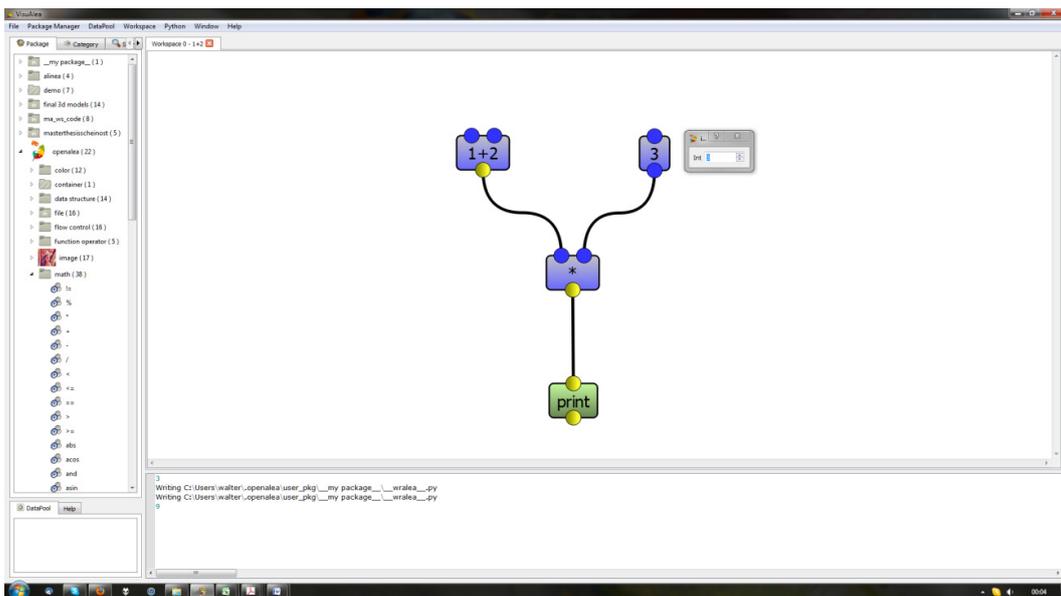


Abbildung 63: Ergebnis nach hinzufügen, einstellen und verbinden der restlichen Widgets

A - 3.2. Programmcode zur Berechnung des Volumens

Der folgende Code bewirkt dient zur Berechnung des Volumens im Programm VisuAlea. Die veränderlichen Abschnitte werden in rot dargestellt. Mit freundlicher Unterstützung von Christophe Godin.

```

from openalea.plantgl.all import *
from openaleamtg.aml import MTG
from openaleamtg.dresser import dressing_data_from_file
from openaleamtg.plantframe import PlantFrame, compute_axes, build_scene
from collections import defaultdict
from math import pi

# creates a geometric interpretation of the mtg g at the scale "scale".
def plant_frame(g, scale=3):
    topdia = lambda x: g.property('diameter').get(x) # shortcut for a function returning the measured
    diameters
    pf = PlantFrame(g, TopDiameter=topdia)
    return pf

def plot(pf):
    g = pf.g
    diam = g.property('diameter')

    def color(vid):
        dia = diam[vid]
        if dia < 1.:
            return (0,0,0)
        elif 1. <=dia < 2.:
            return (85, 170, 0)
        elif 2. <=dia < 3.:
            return (170, 0, 0)
        elif 3. <=dia < 4.:
            return (0,0,255)
        else:
            return (170,255,255)

    scene = build_scene(pf.g, pf.origin, None, pf.points, pf.top_diameter, 10000, option='cylinder',
    colors = color)
    Viewer.display(scene)

# computes the length of the segment corresponding to vertex vid (uses pf coordinates for this)
def get_length(vid, pf):
    parent_id = pf.g.parent(vid)
    pt1 = pf.points.get(parent_id, (0,0,0))
    pt2 = pf.points.get(vid)
    return norm(Vector3(pt2)-Vector3(pt1))

# Computes the volume of the plant corresponding to the plantframe pf
def volume(pf, scale=3):
    diameters = pf.g.property('diameter')
    volumes = {}
    lengths = {}

```

```
# creates new properties (as dictionaries) corresponding to
# length and volume of vertices
for vid in g.vertices(scale=scale):
    length= get_length(vid, pf)
    diameter = diameters.get(vid,0.)
    lengths[vid] = length
    volumes[vid] = length * pi * (diameter**2) / 4. # cylinder assumed here
g.add_property('volume')
g.properties()['volume'] = volumes
g.add_property('length')
g.properties()['length'] = lengths
return sum(volumes.values()) # sum up the set of all computed volumes values and returns

##### Main Script #####
fn = 'Dateipfad\Dateinamemtg'
g = MTG(fn)
scale = 3
pf = plant_frame(g, scale=scale)
print 'volume: ', volume(pf, scale=scale)
plot(pf)
```

A - 4. Aufschlüsselung der Messergebnisse

Der folgende Abschnitt beinhaltet die mtg-Dateien der beiden Messungen im April 2010 bzw. April 2011

A - 4.1. mtg-Datei: Erste Messung - April 2010

CODE: FORM-A

CLASSES:

SYMBOL	SCALE	DECOMPOSITION	INDEXATION	DEFINITION
\$	0	FREE	FREE	IMPLICIT
P	1	FREE	FREE	EXPLICIT
A	2	FREE	FREE	EXPLICIT
S	3	FREE	FREE	EXPLICIT
L	3	FREE	FREE	EXPLICIT
B	3	FREE	FREE	EXPLICIT

DESCRIPTION:

LEFT	RIGHT	RELTYPE	MAX
A	A	<	?
A	A	+	?
S	S	<	?
S	S	+	?
S	L	<	?
S	L	+	?
S	B	<	?
S	B	+	?
L	S	<	?
L	S	+	?
L	L	<	?
L	L	+	?
L	B	<	?
L	B	+	?
B	S	<	?
B	S	+	?
B	L	<	?
B	L	+	?
B	B	<	?
B	B	+	?

FEATURES:

NAME	TYPE
XX	REAL
YY	REAL
ZZ	REAL
AA	REAL
BB	REAL
CC	REAL
diameter	REAL

3d – Pflanzendigitalisierung

MTG:		XX	YY	ZZ	AA	BB	CC	diameter
ENTITY-CODE								
	/P1							
	^/A1/S1	0	0	0	19.19	-15.5	-58.97	3.6
	^<S2	1.41	-1.13	-7.1	9.57	-5.38	-37.4	3.5
	^<S3	2.55	-2.8	-12.32	6.8	-4.96	-10.31	3.3
	^<S4	3.53	-4.22	-17.63	0.95	-3.17	10.22	3.3
	^<S5	4.42	-5.11	-22.24	3.5	-8.1	-6.56	3.2
	^<S6	5.37	-6.05	-27.97	0.13	-7.29	-10.51	3.1
	^<S7	6.01	-7.13	-33.7	2	-3.49	-16.43	3.1
	^<S8	5.96	-7.91	-38.71	0.86	-2.64	-17.92	3
	^<S9	5.77	-8.15	-44.22	0.14	-0.96	-21.51	2.8
	^<S10	6.04	-8.57	-50.91	2.37	-5.66	-20.48	2.9
	^<S11	7.13	-7.34	-55.94	-10.75	-12.74	-4.82	2.6
	^<S12	8.57	-6.28	-61.99	-4.58	-10.65	-4.55	2.5
	^<S13	9.35	-5.72	-67.09	-4.14	-8.73	-12.34	2.5
	^<S14	10.06	-5.89	-73.14	-0.69	-5.68	-11.29	2.5
	^<S15	11.11	-5.81	-78.56	12.69	-6.7	-18.74	2.2
	^<S16	12.17	-5.98	-83.58	13.26	-7	-17.27	2.2
	^<S17	13.62	-5.66	-88.69	11.34	-5.3	-15.99	2.3
	+A1/S1	13.47	-4.71	-88.9	-5.97	-18.03	8.13	1.2
	^<S2	13.31	0.32	-92.8	8.13	-17.48	-14.92	0.9
	^<S3	13.7	2.96	-94.78	102.88	-61.22	-104.5	0.8
	+A1/S1	12.89	2.86	-95.31	58.22	-1.9	-13.6	0.3
	^<S2	11.98	3.12	-96.07	45.97	8.24	-15.65	0.3
	^<S4	13.73	6.39	-99.2	5.27	-12.76	24.23	0.7
	^<S5	14.21	9.75	-101.25	8.95	-11.51	0.34	0.7
	+A1/S1	14.79	9.73	-101.79	46.23	-66.72	-16.42	0.4
	^<S2	15.71	10.86	-102.99	59.63	-62.04	-27.62	0.3
	^<S6	15.65	14.4	-104.71	-12.07	-16.88	-8.24	0.8
	^<S7	14.71	16.06	-106.98	155.79	-37.83	-176.7	0.9
	+A1/S1	13.73	15.92	-108.23	43.31	11.84	-51.94	0.5
	^<S2	12.51	16.3	-113.12	12.07	-18.6	14.8	0.3
	^<S3	15.21	19.03	-118.18	-6.43	-24.18	46.88	0.1
	^<S8	16.57	20.21	-111.22	3.28	-19.18	-8.15	0.7
	^<S9	15.59	22.77	-115.95	8.53	-13.05	-7.78	0.7
	^<S10	16.2	25.77	-117.95	2.55	-9.74	-32.08	0.7
	+A1/S1	14.34	23.87	-120.32	-28.33	9.21	71.15	0.3
	^<S2	13.43	23.27	-121.5	-21.08	-7.26	70.67	0.3
	^<S11	17.24	27.95	-122.3	2.77	-12.75	-46.84	0.5
	^<S12	16.21	31.42	-126.89	-8.33	-10.92	-76.09	0.6
	^<S13	16.14	34.14	-131.76	2.96	-14.75	-107.03	0.5
	^<S14	16.26	35.82	-134.28	2.77	-14.36	-92.01	0.5
	+A1/S1	14.91	35.98	-134.84	82.7	-44.64	-78.91	0.3
	^<S2	14.49	36.34	-134.62	88.34	-39.67	-84.39	0.3
	^<S3	15.39	36.16	-135.63	55.73	-48.19	-54.05	0.3
	^<S15	13.76	37.55	-138.91	-0.07	-6.59	-15.94	0.4

	^<S16	13.79	38.27	-141.4	38.14	-0.54	-20.65	0.4
	+A1/S1	13.6	38.38	-141.5	62.53	14.37	-18.23	0.2
	^<S2	13.36	38.71	-141.81	51.55	12.42	-9.53	0.2
	^<S17	13.9	40.08	-145.59	-5.79	-3.86	3.5	0.5
	^<S18	14.38	41.21	-148.88	-39.15	-19.62	20.45	0.2
	^<S19	15.92	41.17	-151.11	-65.09	-9.14	49.89	0.1
	^<S20	18.21	41.41	-151.15	-72.46	-8.73	55.57	0.1
^<S18		15.17	-6.42	-93.43	-6.39	-9.81	-10.2	2
^<S19		15.95	-6.84	-97.91	-5.67	-6.27	-10.19	2
	+A1/S1	16.12	-8.35	-98.43	-1.11	-4.29	-8.7	1.1
	^<S2	16.62	-13.01	-102.39	-6.73	-6.12	0.55	1.1
	^<S3	17.43	-15.98	-105.08	-7.63	-5.38	-3.61	1
	+A1/S1	17.83	-15.91	-105.93	-41.02	-27.22	31.54	0.4
	^<S2	18.63	-15.65	-107.25	-23.92	-24.42	27.49	0.3
	^<S4	18.45	-19.23	-108.01	-13.79	-16.76	10.89	1
	^<S5	19.45	-22.9	-110.75	-59.45	-44.49	48.02	1
	+A1/S1	18.99	-23.18	-110.96	-59.93	-36.57	37.14	0.5
	^<S2	16.7	-27.68	-114.1	-51.16	-20.8	40.17	0.5
	^<S3	14.26	-30.6	-117.31	-59.59	-15.88	42.32	0.4
	^<S4	12.24	-33.67	-121.68	-57.71	-11.98	37.68	0.3
	^<S5	9.89	-37.16	-126.98	-57.64	-16.15	27.76	0.3
	^<S6	9.41	-39.02	-129.27	-65.78	-22.24	29.43	0.3
	^<S7	7.55	-41.47	-132.08	-74.79	-24.53	26.7	0.2
	^<S8	6.48	-43.15	-133.77	-81.05	-20.52	29.66	0.2
	^<S9	5.48	-44.69	-137.01	-82.53	-19.52	36.68	0.3
	^<S10	4.95	-44.57	-136.9	-45.49	-13.94	16.21	0.3
	^<S6	21	-26.15	-113.74	-71.44	-49.79	61.77	0.8
	^<S7	22.44	-29.75	-117.34	-66.36	-34.01	48.62	0.9
	+A1/S1	23.64	-29.97	-117.73	-103.79	-25.05	81.39	0.3
	^<S2	28.25	-33.02	-117.37	-110.01	-17.25	92.57	0.3
	^<S3	30.3	-34.25	-117.01	-104.49	-14.81	90.05	0.4
	^<S4	33.78	-34.99	-116.87	-96.85	-15.16	89.02	0.2
	^<S5	37.92	-33.4	-117.94	-40.9	-14.6	9.93	0.2
	^<S8	24.26	-33.08	-120.88	-112.05	-26.2	75.33	0.8
	+A1/S1	23.98	-33.35	-121.58	-103.66	-18.45	57.78	0.5
	^<S2	22.94	-33.83	-125.21	-100.76	-14.71	66.14	0.3
	^<S3	23.16	-34.08	-128.07	-99.59	-9.2	63.05	0.2
	^<S4	24.25	-33.49	-131.25	-96.92	-1.7	57.97	0.1
	^<S5	25.17	-32.81	-133.3	-91.32	3.38	57.05	0.1
	^<S9	26.17	-36.28	-124.93	-100.4	-28.19	58.89	0.5
	^<S10	27.4	-37.65	-127.29	-106.72	-22.68	64.36	0.5
	+A1/S1	27.53	-38.28	-127.19	-117.91	-14.74	65.17	0.3
	^<S2	28.66	-38.9	-127.35	-114.36	-14.6	62.53	0.2
	^<S11	28.46	-39.67	-129.62	-86.29	-36.6	36.77	0.5
	^<S12	29.58	-39.25	-131.6	37.7	1.58	-36.42	0.5
	+A1/S1	29.74	-39.32	-132.35	32.52	-5.45	-20.36	0.3
	^<S2	29.47	-38.93	-134.03	29.29	-4.57	-15.06	0.3

3d – Pflanzendigitalisierung

^<S13		31.31	-41.82	-135.14	26.53	-15.63	-22.87	0.6
^<S14		32.79	-43.46	-137.12	19.09	-18.86	-16.1	0.6
	+A1/S1	32.95	-43.72	-137.36	17.29	-16.01	-16.09	0.3
	^<S2	34.06	-45.12	-137.71	15.62	-16.84	-15.01	0.3
^<S15		33.82	-45.55	-140.92	11.9	-16.63	-9.46	0.5
^<S16		34.92	-46.75	-143.07	10.57	-16.03	-8.85	0.5
^<S17		36.42	-48.58	-147.17	11.62	-14.87	-9.55	0.4
	+A1/S1	36.25	-48.53	-147.58	8.66	-14.74	-8.32	0.3
	^<S2	36.97	-47.91	-148.64	8.37	-13.33	-7.27	0.3
^<S18		38.01	-50.85	-150.76	10.68	-13.22	-10.86	0.4
^<S19		38.82	-53.07	-153.52	9.03	-12.27	-8.81	0.4
	+A1/S1	38.47	-53.52	-153.79	3.17	-15.82	2.52	0.2
	^<S2	38.22	-54.39	-154.3	-0.03	-15.47	2.8	0.2
^<S20		40.02	-54.32	-156.52	-18.24	-21.65	-18.68	0.3
^<S21		40.69	-55.56	-161.76	-20.01	-16.57	-16.83	0.3
^<S22		41.12	-56.85	-167.77	-20.86	-11.55	-15.58	0.3
^<S23		42.64	-57.21	-171.84	-18.68	-17.12	-13.07	0.2
^<S24		43.11	-57.46	-175.1	-14.49	-14.02	-14.52	0.2
^<S25		42.49	-58.73	-179.78	-16.54	-10.74	-9.99	0.1
^<S26		42.27	-58.73	-182.74	-13.4	-7.63	-9.94	0.1
^<S20		17.15	-7.04	-102.82	4.64	-4.51	-4.72	1.8
^<S21		17.52	-7.36	-107.36	-2.15	-5.03	-4.74	1.8
	+A1/S1	17.99	-6.33	-107.36	-12.16	-13.43	-8.86	1.1
	^<S2	19.4	-1.02	-110.55	-6.75	-12.36	-7.55	0.8
	^<S3	20.47	2.87	-113.27	-3.77	-10.25	-21.32	0.8
	^<S4	21.91	6.95	-116.95	-0.6	-12.88	1.27	0.8
	^<S5	23.05	8.43	-118.7	-11.69	-11.24	18.47	0.8
	+A1/S1	21.98	8.06	-119.33	-40.06	8.89	76.77	0.4
	^<S2	22.8	9.68	-120.2	-31.99	11.74	74.51	0.4
^<S6		21.92	11.01	-122.77	-19.7	-2.38	67.56	0.6
^<S7		23.02	13.42	-125.33	-27.84	-9.76	42.65	0.7
	+A1/S1	24.05	13.84	-125.28	-19.63	2.64	-2.52	0.5
	^<S2	22.78	13.89	-129.38	-25.56	3.75	7.46	0.4
	^<S3	23.23	14.12	-132.94	-29.84	6	10.47	0.3
	^<S4	23.35	14.96	-135.55	-28.05	6.63	8.61	0.1
	^<S5	23.43	16.84	-136.95	-26.49	10.06	10.35	0.1
^<S8		25.41	17.1	-127.83	-23.57	-1.3	8.08	0.5
	+A1/S1	25.45	17.36	-127.96	-27.58	-3.28	28.21	0.3
	^<S2	26.02	18.24	-128.38	-28.25	-1.22	30.99	0.3
^<S9		26.63	20.38	-131.76	-24.17	-10.7	13.44	0.5
^<S10		27.8	22.33	-135.18	-24.81	-4.53	15.85	0.5
	+A1/S1	28.37	21.8	-135.14	-26.42	-5	15.83	0.3
	^<S2	27.5	21.34	-136.95	-30.35	-1.6	15.81	0.3
^<S11		29.33	25.22	-138.95	-24.83	-1.12	14.23	0.4
^<S12		30.54	25.92	-140.63	-27.85	2.07	14.01	0.5
	+A1/S1	32.06	26.31	-140.32	-51.96	1.24	32.4	0.3
	^<S2	32.07	27.03	-141.13	-52.45	3.8	34.97	0.3

^<S13		31.82	28.95	-145.51	-52.45	7.88	31.92	0.4
^<S14		33.49	30.91	-149.91	-50.72	15.51	34.79	0.4
	+A1/S1	34.72	31.41	-148.93	9.46	41.07	-32.39	0.2
	^<S2	34.63	32.09	-149.1	9.26	41.16	-30.35	0.2
^<S15		33.69	31.66	-153.56	-111.95	14.68	34.18	0.3
^<S16		34.33	32.64	-157.09	-118.54	21.48	27.62	0.3
	+A1/S1	35.76	33.54	-155.79	7.26	-22.56	-37.2	0.2
	^<S2	35.5	33.52	-155.74	7.86	-24.47	-36.19	0.2
	^<S3	36.36	33.75	-156.28	4.8	-21.64	-35.69	0.2
^<S17		35.16	34.03	-160.35	-126.63	18.46	22.82	0.3
^<S18		34.43	35.19	-165.24	-127.76	14.54	18.02	0.3
^<S19		35.69	35.64	-169.19	-123.59	15.46	13.63	0.2
^<S20		35.48	35.03	-174	-122.03	11.65	12.35	0.1
^<S22		17.87	-7.41	-113.8	-14.39	-7.72	9.08	1.6
^<S23		18.18	-7.89	-118.46	-77.99	-7.99	62.74	1.6
	+A1/S1	16.81	-8.59	-119.43	-68.4	-3.53	59.98	0.6
	^<S2	14.06	-8.83	-122.68	-75.5	-0.63	58.29	0.6
	^<S3	11.64	-9.5	-125.81	-84.01	4.87	58.8	0.5
	+A1/S1	11.46	-9.16	-125.44	-109.2	42.72	79.42	0.3
	^<S2	10.55	-8.65	-126.3	-110.98	36.65	73.22	0.3
^<S4		9.27	-10.1	-128.08	-103.7	-15.34	49.61	0.5
^<S5		6.61	-9.91	-131.38	-112.69	-5.21	50.98	0.5
^<S6		4.57	-10.1	-133.43	-87.09	8.36	34.58	0.4
	+A1/S1	4.63	-9.36	-133.26	-35.57	36.79	-9.53	0.2
	^<S2	3.74	-9.59	-134.75	-36.33	38.19	-7.02	0.2
^<S7		3.57	-9.43	-135.46	-112.55	24.52	65.77	0.2
^<S8		2.77	-8.22	-136.85	-114.7	28.75	65.69	0.1
^<S9		1.24	-7.62	-136.92	-121.27	29.48	61.3	0.1
^<S10		0.15	-6.11	-135.12	-124.12	26.7	58.51	0.1
^<S24		18.64	-7.51	-122.06	-31.42	-4.8	8.41	1.5
^<S25		19.05	-7.63	-125.71	-36.59	-6.02	18.92	1.5
	+A1/S1	19.47	-7.02	-125.75	-50.25	-5.07	33.05	0.5
	^<S2	22.12	-3.93	-129.13	-42.35	-5.87	33.7	0.4
	^<S3	23.94	-2.08	-131.38	-38.29	-3.6	32.92	0.5
	+A1/S1	24.8	-1.97	-131.5	-76.19	29.2	72.24	0.3
	^<S2	25.67	-1.68	-131.82	-72.69	30.64	74.52	0.3
^<S4		25.63	-0.13	-134.15	-67.66	33.65	72.41	0.4
^<S5		27.21	2.01	-136.51	-59.55	30.97	67.32	0.4
^<S6		30.47	5.59	-139	-35.54	-4.55	42.93	0.4
^<S7		32.07	7.05	-142.1	-37.14	-4.41	45.04	0.4
^<S8		33.06	7.83	-144.03	-55.47	-3.61	52.59	0.5
^<S9		34.22	8.99	-144.56	-50.45	-1.99	52.42	0.3
^<S10		35.41	8.99	-146.01	-48.63	-0.5	52.74	0.2
^<S11		36	9.11	-147.18	-5.95	-43.58	11.28	0.1
^<S12		35.13	11.23	-146.22	-0.32	-44.12	9.91	0.1
^<S26		19.61	-7.73	-130.92	-39.32	-3.05	1.22	1.4
^<S27		19.53	-7.76	-135.38	-37.1	-0.15	-0.98	1.4

3d – Pflanzendigitalisierung

+A1/S1	20.28	-8.74	-135.39	-5.99	-11.33	-21.35	0.8
^<S2	20.26	-11.37	-138.77	-9.91	-16.64	-20.58	0.8
^<S3	21.05	-15.01	-142.09	-26.17	-24.48	-9.06	0.7
+A1/S1	21.8	-15.37	-142.46	-46.38	-29.66	32.74	0.3
^<S2	22.43	-14.94	-143.51	-43.7	-27.06	27.74	0.3
^<S4	21.22	-17.21	-143.88	-48.73	-44.2	25.15	0.7
^<S5	21.67	-20.55	-146.4	-58.8	-41.78	28.95	0.7
+A1/S1	22.1	-21.42	-146.56	-61.84	-40.06	27.22	0.3
^<S2	21.01	-22.52	-146.95	-70.9	-39.63	30.38	0.3
^<S6	23.32	-23.98	-149.25	-57.34	-48.17	15.26	0.6
^<S7	24.83	-27.88	-151.19	-51.52	-50.89	9.49	0.6
^<S8	26.63	-31.49	-153.56	-55.36	-47.15	13.3	0.5
^<S9	27.52	-34.22	-155.52	-57.13	-46.58	16.61	0.5
+A1/S1	27.06	-34.51	-155.79	-20.19	-31.24	-34.06	0.2
^<S2	27.34	-35.55	-156.02	-25.42	-31.09	-29.81	0.2
^<S10	27.6	-36.48	-158	-20.65	-36.28	-24.71	0.4
^<S11	29.2	-39.08	-160.83	-24.69	-35.45	-17.44	0.4
+A1/S1	29.35	-39.26	-161.32	-28.41	-35.92	-14.03	0.3
^<S2	30.33	-38.99	-161.77	-31.08	-34.97	-10.09	0.2
^<S12	29.48	-40.41	-162.27	-29.63	-34.86	-15.14	0.3
^<S13	30.34	-41.67	-163.35	-29.02	-32.6	-14.13	0.5
^<S14	31.24	-42.88	-164.19	-29.58	-32.29	-15.8	0.5
+A1/S1	30.73	-42.86	-165.1	-36.44	-25.94	-9.91	0.3
^<S2	30.71	-43.38	-165.83	-38.88	-25.12	-9.44	0.3
^<S15	32.03	-43.58	-165.9	27.75	-12.37	-66.2	0.3
^<S16	33.1	-44.72	-167.56	22.52	-10.61	-61.25	0.2
^<S17	32.62	-45.01	-169.37	22.5	-6.45	-60.13	0.1
^<S18	32.13	-44.27	-170.25	22.2	-6.92	-58.05	0.1
^<S28	20.8	-7.69	-139.27	-23.23	-12.75	-2.07	1.3
^<S29	22.08	-7.38	-143.7	9.23	-23.54	-32.01	1.3
+A1/S1	21.93	-6.66	-144.11	20.6	-33.11	-39.38	0.7
^<S2	21.65	-3.63	-147.57	-3.06	-10.01	-27.16	0.7
^<S3	22.06	-0.77	-150.61	-14.66	8.98	-22.68	0.7
+A1/S1	21.67	-0.77	-150.87	-15.52	11.24	-26.01	0.3
^<S2	21.17	-0.7	-151.53	-15.65	10.87	-26.25	0.3
^<S4	21.79	2.74	-153.07	-6.89	-9.03	-18.34	0.6
^<S5	22.38	4.07	-153.62	26.18	-45.71	-38.29	0.6
+A1/S1	21.87	2.73	-154.36	-57.8	47.86	40.96	0.2
^<S2	22.41	3.93	-154.85	-60.35	45.81	41.93	0.2
^<S6	21.95	7.12	-157	-33.45	25.77	6.37	0.5
^<S7	22.35	10.07	-159.72	-11.45	-7.4	-3.4	0.5
^<S8	23.51	13.48	-163.16	19.85	-29.71	-37.7	0.5
+A1/S1	23.21	13.65	-163.56	-37.14	34.36	-21.47	0.3
^<S2	23.39	13.49	-164.58	-38.67	34.63	-21.59	0.3
^<S9	23.65	15.62	-165.87	-37.42	32.69	-17.53	0.4
^<S10	25.16	17.93	-168.59	-32.09	32.21	-11.76	0.4
^<S11	23.98	18.49	-172.04	-80.91	12.21	11.85	0.4

	^<S12	24.85	19.94	-174.5	-79.43	14.82	14.78	0.3
	^<S13	26.65	21.66	-175.04	-36.3	7.13	-16.85	0.2
	^<S14	26.76	22.68	-174.3	-38.59	-9.27	-6.63	0.1
	^<S15	26.46	22.55	-174.07	-38.71	-8.86	-6.64	0.1
	+A1/S1	27.7	23.17	-173.22	7.44	-2.87	-31.88	0.1
	^<S2	27.39	21.75	-172.71	3.68	-4.19	-30.51	0.1
	^<S16	26.62	22.13	-173.05	-62.13	-3.14	1.18	0.1
^<S30		23.65	-8.05	-146.83	-1.55	-12.66	-20.34	1.2
^<S31		24.04	-7.73	-148.69	28.95	-9.71	-38.73	1.2
	+A1/S1	24.42	-8.32	-149.08	47.08	9.28	-67.94	0.7
	^<S2	28.87	-11	-152.32	17.79	-48.61	-15.25	0.6
	^<S3	32.1	-13.48	-155	29.24	-53.13	-24.47	0.6
	^<S4	34.28	-15.26	-156.79	17.29	-51.2	-15.28	0.5
	+A1/S1	35.94	-14.25	-155.34	49.12	-7.71	-74.73	0.3
	^<S2	37.03	-14.8	-155.56	45.63	-7.96	-73.25	0.3
	^<S5	36.02	-15.88	-157.62	18.55	-54.48	-8.38	0.5
	^<S6	37.71	-16.64	-159.01	14.11	-51.88	-6.19	0.5
	+A1/S1	38.33	-16.3	-158.78	23.33	-44.97	-26.63	0.3
	^<S2	38.39	-15.76	-159.47	24.15	-41.81	-27.71	0.3
	^<S7	40.28	-18	-160	8.68	-50	-8.21	0.4
	^<S8	42.32	-20.27	-161.37	-0.06	-48.75	-3.67	0.4
	^<S9	46.47	-22.73	-164.36	-2.48	-42.71	-6.29	0.3
	+A1/S1	46.91	-22.41	-164.7	-3.65	-45.48	-5.3	0.2
	^<S2	47.74	-21.79	-165.21	-5.33	-42.63	-4.7	0.2
	^<S10	49.24	-24.65	-166.82	-5.35	-43.52	-5.06	0.3
	^<S11	51.42	-27.08	-169.21	-11.49	-38.61	1.02	0.3
	^<S12	52.41	-27.87	-170.83	-13.52	-34.16	0.29	0.2
	^<S13	53.49	-28.29	-172.25	-13.11	-29.87	1.1	0.2
	^<S14	53.84	-30.14	-175.15	-17.19	-23.53	3.21	0.1
^<S32		24.4	-7.34	-151.86	48.87	2.4	-42.8	1.3
	+A1/S1	23.56	-7.33	-152.16	60.17	1.17	-49.95	0.8
	^<S2	19.13	-4.99	-156.18	62.09	-5.61	-60.79	0.8
	+A1/S1	18.61	-5.21	-155.7	35.74	14.1	-58.39	0.2
	^<S2	16.86	-4.73	-156.96	51.01	-17.65	-38.55	0.2
	^<S3	17.34	-4.65	-158.47	40.62	10.1	-43.64	0.7
	^<S4	15.49	-4.68	-160.81	43.94	13.06	-43.37	0.7
	+A1/S1	15.34	-4.68	-160.97	72.72	-19.6	-57.28	0.2
	^<S2	16.25	-4.76	-162.39	66.78	-17.22	-52.28	0.2
	^<S5	16.44	-2.37	-163.53	53.69	-22.21	-67.12	0.6
	+A1/S1	11.93	-3.98	-164.19	83.89	-24.49	-51.11	0.2
	^<S2	10.97	-3.78	-164.44	83.87	-24.93	-51.22	0.3
	^<S6	10.99	-2.7	-167.57	93.73	-25.78	-58.05	0.5
	^<S7	9.8	-2.42	-170.27	97.54	-24.99	-58.95	0.5
	^<S8	9.1	-1.1	-173.34	99.54	-28.84	-53.74	0.4
	^<S9	7.85	-0.35	-176.69	98.06	-28.74	-49.47	0.4
	+A1/S1	8.31	-0.77	-177.21	-27.59	7.06	-3.45	0.3
	^<S2	10.29	4.33	-181.25	-22.63	4.56	2.76	0.2

3d – Pflanzendigitalisierung

	^<S3	11.42	6.73	-184.64	-18.8	4.15	6.78	0.2
	^<S4	12.04	9.8	-188.56	-10.69	12.8	11.1	0.2
	^<S5	12.56	11.73	-191.67	-9.72	12.91	14.32	0.2
	^<S10	7.42	1.11	-179.54	-22.04	24.49	-10.55	0.3
	^<S11	6.93	1.42	-182.12	-22.35	20	-3.08	0.4
	^<S12	6.28	1.76	-183.91	42.42	0.94	-27.38	0.3
	+A1/S1	6.63	2.27	-184.16	48.83	0.85	-28.98	0.3
	^<S2	6.03	2.83	-184.85	45.73	-0.86	-25.65	0.3
	^<S13	6.59	1.72	-185.46	51.14	-0.9	-26.92	0.3
	^<S14	6.31	1.56	-187.35	51.23	1.04	-24.98	0.2
	^<S15	6.91	1.6	-189.75	51.87	0.5	-23	0.1
	^<S16	8.22	0.44	-191.23	47.38	1.35	-17.34	0.1
^<S33		23.57	-8.46	-156.55	-116.32	7.02	-7.02	1.2
^<S34		24.3	-8.86	-159.59	-115.75	11.44	1.13	1.1
	+A1/S1	24.77	-8.93	-159.78	-107.11	-8.49	-6	0.5
	^<S2	24.2	-9.02	-160.86	-108.27	-7.64	-6.28	0.5
^<S35		25.63	-10.38	-162.33	-116.1	0.81	-5.99	1
^<S36		26.03	-9.66	-163.79	-113.09	7.69	-11.33	1
	+A1/S1	27.16	-7.9	-163.53	-104.39	41.16	-29.21	0.5
	^<S2	28.88	-8.09	-166.17	-113.33	11.02	19.95	0.5
^<S37		26.6	-10.17	-169.5	-121.8	-3.24	-8.71	0.8
^<S38		26.89	-9.65	-170.97	-116.55	-2.13	-14.58	1
	+A1/S1	27.38	-9.83	-171.38	-173.45	3.05	51.92	0.4
	^<S2	28.11	-15.48	-174.77	-167.54	5.83	52.1	0.4
	^<S3	28.61	-18.45	-178.52	-166.06	7.04	51.14	0.4
	^<S4	29.26	-20.76	-181.43	-162.94	4.7	52.32	0.3
	^<S5	29.34	-23.44	-185.63	-160.04	2.89	52.67	0.3
	^<S6	28.55	-27.16	-190.18	-153.3	1.37	49.07	0.3
	^<S7	27.78	-27.81	-194.31	-150.48	2.11	46.59	0.3
^<S39		28.57	-10.39	-175.03	-152.82	3.46	33.1	0.7
^<S40		28.68	-9.79	-178.58	-152.44	9.97	32.34	0.7
	+A1/S1	28.91	-9.42	-178.75	-140.78	16.46	14.74	0.5
	^<S2	27.17	-6.79	-181.92	-143.41	17.38	10.04	0.5
	^<S3	23.57	-4.03	-186.56	-147.06	17.82	7.66	0.4
	^<S4	22.13	-2.09	-189.9	-149.81	19.83	6.13	0.4
	^<S5	20.3	-0.94	-193.12	-151.93	19.92	8.03	0.3
	^<S6	18.39	0.24	-197.39	-153.56	17.99	7.33	0.3
	^<S7	17.21	1.41	-200.29	-154.85	20.04	7.18	0.5
^<S41		31.06	-11.24	-181.44	-110.82	3.64	-11.42	0.8
^<S42		32.7	-10.35	-188.02	-118.33	-0.52	-7.06	0.7
	+A1/S1	32.95	-10.78	-188.16	-119.81	2.01	-10.05	0.5
	^<S2	34.22	-10.66	-188.68	-119.06	1.52	-7.58	0.4
^<S43		33.05	-11.91	-191.33	-116.49	2.74	-7.26	0.6
^<S44		34.03	-11.39	-195.41	-116.66	4.71	-6.31	0.6
	+A1/S1	35.09	-9.68	-194.77	-46.83	-14.57	-56.18	0.5
	^<S2	33.41	-12.87	-199.14	-53.91	-12.76	-47.6	0.4
	^<S3	31.32	-15.98	-204.45	-60.54	-9.03	-38.69	0.4

	^<S4	29.91	-19.41	-209.1	-64.26	-7.52	-31.81	0.3
	^<S5	30.15	-22.41	-213.85	-68.42	-7.1	-21.56	0.3
	^<S6	25.66	-25.58	-216.74	-79.71	-5.68	-10.4	0.3
	^<S45	35.41	-13.08	-199.22	-120.84	5.04	21.2	0.6
	^<S46	36.48	-12.91	-202.9	-118.62	7.94	21.22	0.6
	+A1/S1	37.73	-9.2	-203.54	-92.66	55.02	-14.94	0.5
	^<S2	39.59	-7.13	-207.52	-106.62	37.4	12.4	0.4
	^<S3	41.55	-4.68	-212.62	-108.3	36.92	18.09	0.4
	^<S4	43.88	-0.98	-217.37	-106.35	39.9	16.4	0.3
	^<S5	45.68	1.25	-220.9	-103.79	41.22	19.14	0.3
	^<S6	46.85	1.82	-224.04	-116.05	21.67	24.39	0.2
	^<S7	48.55	2.83	-227.95	-115.03	23.53	28.93	0.2
	^<S47	38.69	-10.14	-205.82	-77.9	-11.96	-8.28	0.5
	^<S48	39.46	-11.56	-209.32	-78.32	-5.9	-1.16	0.7
	^<S49	40.46	-10.31	-211.22	-70.19	-9.35	-2.39	0.6
	^<S50	41.29	-10.48	-214.44	-72.56	-6.04	-3.56	0.6
	+A1/S1	40.89	-11.46	-215.07	-76.34	-4.52	13.84	0.5
	^<S2	41.73	-11.82	-216.13	-77.98	-12.49	23.54	0.5
	^<S51	40.39	-10.74	-216.73	-129.32	-5.2	33.32	0.4
	^<S52	40.35	-11.85	-218.03	-128.66	-3.07	35.48	0.3
	+A1/S1	40.37	-11.83	-218.62	129.45	12.1	29.28	0.1
	^<S2	40.02	-12.12	-221.48	133.77	21.62	28.69	0.1
	^<S53	40.72	-11.62	-220.13	166.79	15.28	33.07	0.2
	^<S54	39.74	-10.13	-221.25	-132.66	4.58	0.51	0.1

A - 4.2. mtg-Datei: Zweite Messung - April 2011

CODE: FORM-A

CLASSES:

SYMBOL	SCALE	DECOMPOSITION	INDEXATION	DEFINITION
\$	0	FREE	FREE	IMPLICIT
P	1	FREE	FREE	EXPLICIT
A	2	FREE	FREE	EXPLICIT
S	3	FREE	FREE	EXPLICIT
L	3	FREE	FREE	EXPLICIT
B	3	FREE	FREE	EXPLICIT

DESCRIPTION:

LEFT	RIGHT	RELTYPE	MAX
A	A	<	?
A	A	+	?
S	S	<	?
S	S	+	?
S	L	<	?
S	L	+	?
S	B	<	?
S	B	+	?
L	S	<	?
L	S	+	?
L	L	<	?
L	L	+	?
L	B	<	?
L	B	+	?
B	S	<	?
B	S	+	?
B	L	<	?
B	L	+	?
B	B	<	?
B	B	+	?

FEATURES:

NAME	TYPE
XX	REAL
YY	REAL
ZZ	REAL
AA	REAL
BB	REAL
CC	REAL
diameter	REAL

MTG:

ENTITY-CODE	XX	YY	ZZ	AA	BB	CC	diameter
/P1							
^A1/S1	0	0	0	43.97	-12.66	-77.52	3.9
^<S2	2.95	-0.34	-10.11	24.66	-8.33	-13.24	3.7
^<S3	7.45	-0.79	-25.61	29.22	-1.51	-4.07	3.1

^<S4		9.57	-1.79	-38.39	28.7	3.86	-6.34	3	
^<S5		9.93	-3.06	-51.59	-5.9	-0.71	-4.78	3	
^<S6		9.99	0.19	-61.77	9.23	0.78	11.36	2.7	
^<S7		10.65	1.6	-75.35	11.04	-2.45	17.37	2.4	
^<S8		12.41	3.64	-88.84	58.96	-0.53	-0.3	2.4	
	+A1/S1	11.19	4.31	-89.33	49.78	0.66	-3.14	1.2	
	^<S2	5.47	8.99	-95.23	-27.93	44.98	10.67	0.9	
		+A1/S1	5.04	8.66	-95.34	-30.18	41.12	-13.67	0.5
		^<S2	4.19	7.88	-96.39	-33.65	41.81	-16.03	0.3
	^<S3	1.42	13.5	-101.12	39.61	0.48	0.5	0.7	
	^<S4	-3.34	18	-107.41	-10.08	50.89	32.28	0.6	
		+A1/S1	-4	17.76	-108.37	11.13	33.24	21.31	0.4
		^<S2	-4.63	17.11	-110.53	-39.26	24.99	71.96	0.4
		^<S3	-13.05	11.78	-116.34	-68.31	-16.64	45.59	0.3
	^<S5	-10.16	23.35	-119.13	-23.74	35.73	7.68	0.7	
		+A1/S1	-9.68	23.49	-119.61	20.14	19.05	-16.31	0.4
		^<S2	-9.75	22.53	-121.34	19.28	18.58	-13.11	0.3
	^<S6	-13.12	26.04	-124.31	118.23	12.24	-13.04	0.7	
		+A1/S1	-13.22	25.86	-124.08	108.59	12.49	1.63	0.5
		^<S2	-13.64	26.21	-124.39	109.29	13.51	0.98	0.3
	^<S7	-16.1	28.32	-130.12	126.97	0.66	38.94	0.6	
		+A1/S1	-16.66	28.5	-130.26	126.43	1.65	35.29	0.4
		^<S2	-17.4	28.99	-130.76	124.89	1.73	34.73	0.3
	^<S8	-18.34	29.93	-135.26	-31.88	31.23	-0.87	0.5	
		+A1/S1	-18.24	30.21	-135.74	-40.4	27.2	9.19	0.3
		^<S2	-17.98	30.83	-136.73	-40.1	28.05	11.98	0.3
	^<S9	-20.66	30.82	-141.27	-36.57	38.57	9.96	0.5	
		+A1/S1	-20.98	30.44	-141.86	-42.53	7.03	19.69	0.3
		^<S2	-21.59	29.67	-141.9	-44.24	6.38	18.86	0.3
	^<S10	-21.46	31.33	-144.37	127.79	8.78	19.46	0.5	
		+A1/S1	-21.96	31.74	-144.76	155.44	12.37	44.51	0.2
		^<S2	-22.28	32.44	-145.62	156.25	13.54	42.35	0.2
	^<S11	-23.37	32.32	-145.11	135.24	14.74	-2.94	0.5	
		+A1/S1	-22.74	32.23	-145.25	-74.66	16.62	13.44	0.4
		^<S2	-23.64	32.71	-147.31	-61.19	35.4	7.03	0.3
	^<S12	-22.53	34.79	-163.17	100.45	14.36	11.42	0.2	
^<S9		14.03	4.72	-98.2	123.01	7.03	-4.59	2.1	
	+A1/S1	15.17	3.87	-98.55	-138.5	3.78	6.54	1.2	
	^<S2	21.56	-0.35	-105.8	-162.6	38.84	68.13	1	
		+A1/S1	21.34	0.14	-106.18	158.85	27.92	57.98	0.5
		^<S2	21.79	0.62	-107.58	-159.1	28.43	57.3	0.4
	^<S3	26.69	-4.19	-110.82	160.66	46.6	81.94	1	
		+A1/S1	27.42	-4.27	-111.27	162.49	44.6	80.46	0.7
		^<S2	29.11	-10.72	-115.76	157.1	35.59	69.45	0.7
		^<S3	32.49	-28.03	-132.26	166.16	28.77	51.98	0.2
		^<S4	32.66	-31.76	-135.38	168.32	33.32	60.65	0.2

3d – Pflanzendigitalisierung

^<S4		34.48	-5.3	-118.23	100.72	6.03	54.37	1.1
	+A1/S1	35.47	-5.89	-117.77	-83.04	-1.24	9.85	0.6
	^<S2	40.34	-4.53	-117.62	-83.26	-3.45	10.42	0.4
	^<S3	41.81	-3.87	-116.52	-81.78	-4.1	9.82	0.4
	^<S4	44.67	-2.31	-116.1	-79.69	-1.35	9.52	0.3
^<S5		38.2	-8.57	-120.97	100.42	25.76	40.24	1
	+A1/S1	37.46	-8.51	-123.88	-92.36	-8.21	-14.22	0.3
	^<S2	37.92	-8.17	-124.87	103.49	9.21	8.92	0.3
					-			
	+A1/S1	38.09	-8.25	-125.48	104.16	7.93	21.36	0.2
	^<S2	41.02	-6.71	-132.65	-99.06	15.54	21.2	0.1
	^<S3	37.68	-8.29	-124.99	118.28	14.87	33.47	0.3
	^<S4	35.4	-11.68	-133.75	125.51	1.1	28.79	0.2
^<S6		43.63	-7.65	-127.24	-91.26	3.21	18.27	0.9
	+A1/S1	44.28	-7.66	-126.82	-89.34	6.2	18.95	0.4
	^<S2	45.1	-7.64	-127.12	-88.28	7.62	20.77	0.3
^<S7		46.89	-9.29	-131.79	-177.1	31.46	-1.46	0.7
	+A1/S1	47.01	-8.05	-132.29	-87.06	5.99	14.95	0.3
	^<S2	46.15	-8	-134.45	-91.34	14.02	15.85	0.3
					-			
	^<S3	44.93	-7.82	-137.13	121.38	8.7	33.59	0.2
	^<S4	45.87	-8.58	-138.33	130.34	7.3	39.51	0.1
^<S8		51.98	-8.95	-136.88	101.05	7.79	21.35	0.7
					-			
	+A1/S1	52.73	-8.51	-136.82	113.58	6.67	16.42	0.4
	^<S2	54.98	-9.74	-137.19	120.25	5.52	22.17	0.3
^<S9		56.47	-9.34	-142.57	105.73	6.32	14.56	0.6
					-			
	+A1/S1	57.26	-9.25	-142.34	106.26	7.21	13.36	0.3
	^<S2	57.72	-9.48	-142.49	104.79	6.49	13.51	0.3
^<S10		59.17	-9.49	-145.94	111.37	9.46	15.31	0.5
					-			
	+A1/S1	58.66	-9.41	-146.65	-112.1	9.62	12.24	0.4
	^<S2	57.87	-9	-148.55	114.05	10.33	10.29	0.3
^<S11		63.33	-10.59	-153.26	138.41	18.56	5.62	0.5
					-			
	+A1/S1	63.88	-11.05	-153.49	141.04	21.34	7.12	0.3
	^<S2	64.94	-13.25	-154.68	-153.3	12.1	16.59	0.2
^<S12		65.62	-11.32	-158.63	159.52	23.55	27.91	0.5
					-			
	+A1/S1	65.67	-10.83	-159	134.62	17.45	30.87	0.3
	^<S2	66.89	-10.87	-160.28	133.15	20.38	30.84	0.3
^<S13		68.1	-11.93	-167.72	124.3	5.67	20.39	0.4
					-			
	+A1/S1	68.12	-12.1	-168.26	107.02	8.97	18.66	0.4
	^<S2	64.68	-14.83	-173.38	106.49	10.27	25.59	0.3
^<S14		70.65	-11.44	-174.03	113.94	11.05	16.33	0.4
					-			
	+A1/S1	71	-11.65	-174.31	100.76	3.58	27.05	0.2
	^<S2	71.59	-11.74	-182.43	98.24	3.23	23.32	0.1
^<S15		71.17	-11.06	-173.75	108.17	4.53	18.66	0.4
^<S16		80.5	-5.34	-186.21	94.55	3.35	14.6	0.3
					-			
^<S10		14.93	5.58	-107.88	156.58	9.38	13.56	2
					-			
	+A1/S1	14.07	6.41	-107.88	145.26	10.11	6.78	1.1
	^<S2	10	12.17	-112.38	138.12	33.7	20.59	0.9

	+A1/S1	10.28	12.86	-112.36	165.34	3.42	85.16	0.7
	^<S2	10.8	13.48	-113.51	163.29	0.96	82.41	0.3
^<S3		6.67	16.09	-116.29	153.13	11.76	33.67	0.8
^<S4		4.76	18.48	-118.71	148.62	-35.82	43.76	0.9
	+A1/S1	5.42	19.68	-118.43	164.65	6.76	1.12	0.4
	^<S2	4.48	20.93	-119.25	166.64	6.75	1.5	0.3
^<S5		1.55	22.55	-124.45	151.22	-20.29	39.3	0.7
	+A1/S1	2.27	23.43	-125.45	165.78	9.16	6.86	0.5
	^<S2	2.04	23.14	-128.59	165.96	4.93	6.68	0.5
	^<S3	-3.72	20.52	-140.69	150.11	-6.08	15.92	0.3
^<S6		0.62	26.93	-127.57	164.89	9.67	-2.13	0.7
	+A1/S1	0.34	27.15	-127.11	150.87	26.94	-19.47	0.5
	^<S2	-0.09	28.13	-127.28	153.19	26.68	-19.91	0.3
^<S7		-0.51	30.18	-130.46	168	-21.62	22.82	0.8
	+A1/S1	-0.96	30.27	-130.78	131.69	41.32	0.04	0.3
	^<S2	-1.45	30.46	-131.28	133.82	42.32	-1.72	0.2
^<S8		-1.63	33.05	-133.88	177.18	-15.08	19.51	0.6
	+A1/S1	-1.47	32.51	-134.24	176.55	-13.99	23.65	0.4
	^<S2	-1.62	32.31	-135.07	176.54	-13.71	22.49	0.3
^<S9		-3.52	36.65	-139.43	163.92	-25.61	24.47	0.4
	+A1/S1	-3.75	37.53	-139.44	177.67	-12.36	3.22	0.3
	^<S2	-4.29	39.61	-140.07	179.46	-11.67	3.64	0.3
^<S10		-4.86	38.36	-142.68	150.34	-31.66	38.5	0.4
	+A1/S1	-5.45	37.83	-143.15	149.29	-29.98	35.49	0.3
	^<S2	-5.8	37.73	-143.29	149.2	-29.05	35.48	0.2
^<S11		-5.88	42.95	-148.13	-73.21	35.48	8.75	0.4
	+A1/S1	-6.04	42.67	-148.27	-67.23	39.61	7.39	0.3
	^<S2	-6.42	42.64	-148.73	-67.76	39.98	6.76	0.3
^<S12		-6.51	46.18	-154.45	-76.85	44.49	10.71	0.4
	+A1/S1	-6.11	46.58	-154.91	-88.17	40.87	15.45	0.3
	^<S2	-4.33	46.75	-156.53	-88.5	40.38	19.46	0.3
^<S13		-8.22	50.21	-160.72	163.15	3.35	9.86	0.3
	+A1/S1	-8.89	49.76	-160.95	116.99	35.72	11.34	0.2
	^<S2	-9.29	50.66	-161	123.04	36.18	12.72	0.2
^<S14		-8.49	50.95	-163.08	168.31	-0.49	-3.21	0.4
	+A1/S1	-8.39	50.86	-163.55	171.12	-3.22	3.1	0.3
	^<S2	-10.07	46.06	-174.1	164.27	-14.47	9.87	0.3
^<S15		-7.44	57.6	-169.67	161.62	-4.41	15.84	0.2
^<S16		-8.61	67.82	-173.92	166.88	-10.53	3.56	0.2
^<S11		14.91	4.33	-111.11	136.94	0.77	13.85	1.7
	+A1/S1	16.28	5.23	-110.78	-96.29	1.81	15.09	0.3
	^<S2	17	5.13	-110.71	-97.29	0.45	14.79	0.2
^<S12		14.29	5.05	-118.88	143.11	7.86	10.88	1.7
	+A1/S1	15.18	4.45	-118.87	144.68	0.16	88.85	0.6
	^<S2	12.05	0.1	-125.14	160.39	-3.64	74.11	0.6
	+A1/S1	12.42	-0.09	-125.24	90.42	28.76	13.39	0.4

3d – Pflanzendigitalisierung

	^<S2	11.39	-0.32	-125.91	90.7	29.4	13.84	0.4
	^<S3	10.72	-3.94	-129.82	59.41	44.22	21.05	0.6
	^<S4	9.38	-4.82	-131.28	58.74	45.06	19.1	0.5
	+A1/S1	8.85	-4.86	-131.62	43.68	41.77	85.41	0.3
	^<S2	5.38	-4.8	-134.17	46.92	44.98	84.21	0.3
	^<S3	1.6	-4.63	-135.94	51.23	48.22	85.93	0.3
	^<S5	8.68	-5.89	-132.98	9.73	31.25	33.61	0.4
	+A1/S1	8.35	-5.64	-133.11	11.41	28.11	28.84	0.2
	^<S2	5.74	-5.51	-136	22.64	32.64	20.49	0.2
	^<S3	1.53	-5.28	-136.53	30.05	67.21	-19.82	0.1
	^<S6	7.44	-8.65	-135.59	-3.25	30.82	42.5	0.3
	^<S7	5.99	-13.54	-139.51	-12.21	33.92	36.45	0.3
	^<S8	4.33	-17.04	-142.43	-29.27	27.82	34.68	0.3
^<S13		15.1	6.31	-125.08	167.98	6.85	1.46	1.7
	+A1/S1	15.63	7.26	-125.68	158.37	17.24	-4.46	0.7
	^<S2	15.04	14.03	-131.16	151.34	-18.34	34.04	0.7
	+A1/S1	15.4	14.37	-131.16	155.98	-27.05	22.64	0.3
	^<S2	15.83	15.43	-131.6	152.88	-26.17	23.61	0.3
	^<S3	14.3	20.29	-136.25	152.17	-28.77	18.57	0.3
	^<S4	13.93	26.3	-141.76	100.59	38.4	-5.18	0.4
	+A1/S1	14.16	26.37	-142.04	106.31	38.38	-6.83	0.2
	^<S2	14.86	26.63	-143.06	112.92	41.83	-8.84	0.2
	^<S5	13.62	27.42	-143.34	146.07	-15.18	-6.61	0.4
	+A1/S1	13.92	27.61	-143.2	144.9	-15.17	-5	0.2
	^<S2	13.99	28.88	-144.45	143.67	-14.05	-5.16	0.2
	^<S6	13	29.65	-146.72	150.82	-21.89	-5.65	0.2
	^<S7	12.53	33.34	-149.33	146.41	-24.79	-7.29	0.2
	^<S8	11.27	36.34	-152.16	146.6	-24.62	-12.13	0.2
^<S14		15.89	6.86	-130.76	175.52	4.52	-1.89	1.6
^<S15		14.86	6.77	-135.4	168.11	4.72	-2.84	1.6
	+A1/S1	17.05	5.82	-135.88	144.72	7.83	-4.78	0.8
	^<S2	22.57	2.36	-142.38	140.41	16.65	-5.43	0.8
	+A1/S1	22.75	2.24	-142.64	161.24	0.61	18.25	0.3
	^<S2	22.75	3.45	-143.61	162.52	1.9	17.46	0.3
	^<S3	27.51	-0.97	-146.54	-119.1	-0.32	-11.39	0.7
	+A1/S1	27.09	-1.64	-146.75	-173.1	17.49	17.03	0.4
	^<S2	27.47	-2.61	-146.99	172.56	18.96	17.42	0.4
	^<S4	30.93	-2.92	-149.39	122.61	-3.65	-30.79	0.6
	^<S5	35.37	-4.05	-151.92	-119.9	1.17	-33.69	0.6
	^<S6	40.84	-6.89	-155.44	120.57	-2.52	-32.29	0.6
	+A1/S1	40.78	-6.73	-155.9	153.52	19.6	14.58	0.3
	^<S2	41.59	-7.88	-156.32	-151.1	18.97	15.04	0.3
	^<S7	45.42	-8.45	-161.35	144.39	28.74	16.49	0.5
	+A1/S1	45.38	-8.36	-161.67	142.11	28.75	14.03	0.3
	^<S2	44.27	-7.11	-163.63	144.71	26.15	12.33	0.2
	^<S8	48.24	-9.98	-163.66	136.25	19.26	-13.74	0.5

					-				
		+A1/S1	48.71	-10.15	-163.5	135.49	18.71	-12.03	0.3
		^<S2	49.44	-10.71	-163.78	-134.7	18.64	-12.55	0.3
	^<S9		49.37	-9.41	-164.14	100.87	-19.04	-34.34	0.5
		+A1/S1	49.88	-9.48	-164.26	-98.06	-21.02	-35.9	0.3
		^<S2	50.8	-9.94	-165.06	-98.94	-20.66	-33.38	0.2
	^<S10		53.23	-10.5	-171.5	-83.35	-22.65	-47.95	0.3
	^<S11		55.22	-11.91	-176.91	-92.49	-23.72	-32.82	0.3
	^<S12		55.9	-12.45	-178.82	-93.33	-21.3	-28.98	0.3
^<S16			17.3	7.53	-144.01	-148.7	9.81	-4.09	1.3
		+A1/S1	16.79	8.08	-144.35	115.64	16.21	-18.9	0.7
		^<S2	12.16	12.01	-150.76	158.83	0.38	11.7	0.6
		+A1/S1	12.2	11.84	-150.96	157.47	-21.4	23.54	0.3
		^<S2	12.2	11.25	-151.61	155.85	-19.68	23.3	0.2
	^<S3		9.49	15.23	-153.4	170.31	-33.09	22.61	0.6
		+A1/S1	9.74	15.78	-153.06	170.29	-32.39	16.69	0.3
		^<S2	9.25	17.23	-153.8	174.95	-30.73	18.25	0.2
	^<S4		6.78	18.05	-156.65	155.47	3.18	-16.66	0.5
	^<S5		4.84	20.45	-159.37	160.25	4.7	-16.89	0.5
		+A1/S1	4.64	20.54	-159.37	160.68	17.14	-20.62	0.3
		^<S2	4.34	21.26	-159.52	166.22	20.55	-21.75	0.3
	^<S6		3.07	22.96	-163.07	-176	-14.2	9.56	0.5
	^<S7		2.77	22.85	-163.21	177.71	-12.21	11.27	0.4
		+A1/S1	2.7	22.56	-163.64	178.16	-11.56	9.4	0.4
		^<S2	1.13	20.91	-167.32	173.03	-12.19	16.42	0.3
	^<S8		0.18	27.07	-168.45	177.58	-13.37	3.46	0.3
		+A1/S1	0.27	27.57	-168.19	175.46	-16.04	0.66	0.2
		^<S2	0.07	29.34	-168.93	179.26	-14.9	2	0.2
	^<S9		-0.5	28.02	-169.96	153.55	-23.5	27.13	0.5
		+A1/S1	-0.74	28.23	-170.9	154.34	-20.31	24.2	0.4
		^<S2	-0.66	28.67	-171.57	153.45	-18.99	24.46	0.4
		+A1/S1	-1.87	28.06	-171.97	116.37	42.43	-34.12	0.3
		^<S2	-1.53	30.07	-173.61	136.66	9.78	-29.83	0.2
		^<S3	0.33	30.53	-174.83	157.01	-10.94	22.3	0.2
		^<S4	0.91	33.17	-177.22	154.63	-16.02	24.02	0.3
	^<S10		-3.18	28.14	-174.61	-60	30.74	-34.27	0.3
	^<S11		-5.55	27.62	-179.41	-57.77	33.32	-39.31	0.2
	^<S12		-8.54	25.66	-180.61	-62.97	31.29	-40.09	0.2
^<S17			18.92	8.01	-149.2	-91.63	6.56	-2.18	1.5
		+A1/S1	20	8.14	-149.51	-84.42	-0.47	-9.95	0.7
		^<S2	26.93	10.35	-154.24	-82.24	12.36	-4.91	0.7
		+A1/S1	27.16	10.36	-154.17	-86.39	-19.42	-40.64	0.3
		^<S2	27.12	10.63	-154.71	-86.55	-19.76	-40.27	0.1
	^<S3		31.92	12.1	-156.29	-72.19	-13.12	-29.89	0.6
		+A1/S1	32	12.54	-156.21	-88.1	18.78	-15.27	0.4
		^<S2	33.64	11.95	-156.67	107.41	10.39	4.41	0.4
	^<S4		34.73	13.8	-159.15	-96.55	58.61	7.51	0.6

3d – Pflanzendigitalisierung

	+A1/S1	34.54	13.94	-159.42	-117.3	13.29	0.67	0.4		
	^<S2	34.79	14.46	-160.6	118.46	16.4	-0.28	0.3		
	^<S3	35.09	14.95	-163.52	116.88	17.33	-3.79	0.1		
^<S5		40.72	15.2	-160.84	-85.6	-9.47	-21.87	0.5		
	+A1/S1	41.02	15.11	-160.95	-85.89	-9.73	-21.15	0.3		
	^<S2	41.45	15.7	-160.99	-86.29	-9.98	-20.09	0.3		
^<S6		44.93	16.3	-164.42	135.11	59.8	-46.09	0.5		
	+A1/S1	44.52	16.81	-164.99	-141.6	59.55	-55.04	0.3		
	^<S2	45.28	17.24	-165.5	139.55	60.2	-53.55	0.3		
^<S7		52.1	17.67	-169.46	161.14	61.36	-57.63	0.5		
	+A1/S1	51.39	18.81	-170.11	167.49	28.19	-2.62	0.4		
	^<S2	52.23	18.82	-171.18	170.53	30.13	-2.2	0.2		
^<S8		52.26	18.44	-169.26	177.58	60.38	-119.78	0.4		
^<S9		57.65	23.15	-173.73	174.84	66.77	-133.09	0.3		
^<S10		61.12	25.01	-177.53	164.22	77.18	-138.96	0.3		
^<S18		18.59	8.4	-151.93	126.42	1.98	5.51	1.2		
	+A1/S1	18.53	7.6	-152.44	-64.22	-6.08	-10.88	0.8		
	^<S2	14.22	5.03	-156.55	-78.51	-3.41	-4.85	0.8		
	+A1/S1	14.3	4.96	-156.51	-80.53	-5.46	-5.06	0.3		
	^<S2	13.42	4.45	-156.67	-84.24	-6.58	-1.16	0.3		
^<S3		11.69	2.91	-160.58	-72.5	1.35	-35.41	0.7		
	+A1/S1	12.45	2.31	-161.11	-72.48	6.36	-39.68	0.4		
	^<S2	13.38	3.03	-161.82	-69.42	8.56	-37.76	0.3		
^<S4		8.76	3.73	-163.85	-24.66	28.57	31.24	0.7		
	+A1/S1	8.88	3.27	-163.89	-28.56	20.6	18.56	0.3		
	^<S2	8.19	2.31	-164.35	-30.33	21.11	14.41	0.3		
^<S5		5.86	3.67	-169.03	-26.78	26.07	7.73	0.6		
^<S6		2.15	3.76	-175.51	4.83	27.5	-3.61	0.5		
	+A1/S1	2.13	4.12	-175.76	6.9	20.58	-18.65	0.4		
	^<S2	-1.87	11.32	-182.74	31.29	-9.8	-29.68	0.4		
			+A1/S1	-2.18	11.37	-183.18	30.1	-12.08	-27.53	0.3
			^<S2	-1.05	12.01	-184.28	31.08	-10.48	-26.54	0.3
	^<S3			-4.99	14.04	-185.91	38.43	-6.21	-32.4	0.2
	^<S4			-6.91	16.53	-188.05	41.69	-1.38	-29.63	0.2
	^<S5			-8.42	17.5	-189.13	42.34	-1.06	-26.58	0.3
^<S7				-0.88	3.12	-180.79	43.9	12.38	-63.87	0.5
	+A1/S1			-0.19	3.03	-181.08	36.06	14.39	-60.36	0.2
	^<S2			-0.27	2.54	-181.63	32.86	14.08	-57.79	0.2
^<S8				-1.88	3.53	-183.27	82.38	-10.78	-58.78	0.5
	+A1/S1			-1.57	3.74	-183.42	82.11	-11.95	-59.92	0.3
	^<S2			-1.85	2.96	-186.52	72.91	-9.14	-52.74	0.2
^<S9				-3.22	2.55	-185.81	-1.3	38.45	-89.45	0.4
^<S10				-6.94	2.3	-190.61	-2.35	43.44	-83.95	0.3
^<S11				-10.93	0.55	-194.74	-5.41	52.05	-85.82	0.2
^<S12				-15.18	-1.17	-197.63	-9.54	60.81	-89.89	0.2
^<S13				-18.73	-2.4	-200.54	-11.13	65.88	-90.34	0.3
^<S19				20.2	9.81	-158.9	-118.8	13.66	1.69	1.1

	+A1/S1		20.64	9.49	-159.34	-45.54	-8.73	-34.41	0.7
	^<S2		20.31	8.48	-160.19	-46.04	-8.52	-33.75	0.3
^<S20			22.13	10.46	-163.15	-22.83	-20.1	-45.8	1.1
	+A1/S1		22.06	10.97	-163.55	-20.7	-20.03	-44.96	0.7
	^<S2		22.32	13.34	-165.47	-20.24	-18.7	-42.65	0.5
	^<S3		22.46	16.45	-167.3	-22.76	-16.55	-35.67	0.2
^<S21			22.48	12.11	-170.1	134.24	18.76	10.1	0.8
	+A1/S1		23.31	10.79	-170.71	128.05	6.52	-17.08	0.5
	^<S2		27.29	7.53	-174.13	123.81	2.85	-25.5	0.5
	^<S3		31.66	4.29	-180.47	141.07	-0.89	23.46	0.4
		+A1/S1	32.6	3.74	-181.38	147.55	8.95	38.76	0.3
		^<S2	32.28	5.95	-185.6	149.27	16.26	37.6	0.3
	^<S4		34.94	-0.61	-187.05	134.48	-9.1	15.31	0.3
		+A1/S1	35.11	-0.32	-187.16	-133.9	-8	10.67	0.3
		^<S2	36.34	-3.47	-188.81	-130.8	-3.55	11.26	0.2
	^<S5		37.39	-5.59	-196.27	135.94	-12.93	24.81	0.3
	^<S6		37.6	-9.08	-201.15	139.09	-8.55	33.73	0.3
^<S22			23.66	12.85	-177.58	117.39	15.23	-20.65	1
	+A1/S1		23.06	12.69	-177.56	-97.64	11.26	-40.28	0.5
	^<S2		15.04	12.82	-186.35	103.31	9.63	-33.17	0.4
	^<S3		11.63	12.88	-190.86	103.15	-5.03	-23.97	0.3
		+A1/S1	11.91	12.22	-190.43	-83.28	-2.1	-35.55	0.2
		^<S2	8.88	10.99	-191.56	-92.33	-3.37	-27.72	0.2
	^<S4		6.31	12.19	-198.34	-87.06	-4.2	-25.04	0.3
	^<S5		4.41	10.74	-198.92	-95.68	-6.77	-20.44	0.3
^<S23			26.55	14.82	-187.16	-64.19	-8.87	-45.89	0.8
	+A1/S1		27.03	15.42	-187.11	-61.52	-10.33	-46.65	0.4
	^<S2		31.71	17.36	-190.36	-63.27	-8.45	-38.74	0.2
^<S24			26.83	15.39	-196.19	165.52	14.51	-12.17	0.8
	+A1/S1		26.13	14.64	-196.63	167.74	7.78	-24.08	0.6
	^<S2		29.22	8.85	-205.62	106.11	28.62	33.42	0.5
		+A1/S1	28.9	8.98	-206.09	104.89	27.69	31.63	0.3
		^<S2	26.83	7.97	-208.15	109.14	31.09	35.17	0.2
	^<S3		31.51	3.8	-212.4	47.82	36.46	-9.78	0.4
		+A1/S1	30.67	3.87	-213.75	157.99	19.89	-37.51	0.2
		^<S2	33.18	4.63	-214.92	149.78	15.29	-29.02	0.2
	^<S4		33.58	-3.18	-221.53	95.92	50.28	-21.41	0.2
	^<S5		34.69	-8.76	-225.23	102.73	64.38	-16.47	0.2
	^<S6		36.02	-11.19	-227.29	113.92	65.57	-7.32	0.3
^<S25			28.28	18.25	-203.66	149.08	6.25	-18.12	0.7
	+A1/S1		28.78	18.06	-204.23	144.22	19.98	62.57	0.5
	^<S2		26.68	27.32	-214.32	144.98	15.17	55.66	0.4
		+A1/S1	26.96	28.26	-213.05	173.56	-8.37	80.13	0.3
		^<S2	26.72	28.74	-215.3	169.21	-3.39	77.53	0.2
	^<S3		24.56	34.61	-220.81	146.69	18.5	44.72	0.3
	^<S4		23.3	39.09	-226.06	145.38	14.61	42.5	0.3

3d – Pflanzendigitalisierung

	^<S5	20.06	42.06	-229.05	138.32	12.93	40.11	0.2
^<S26		29.78	19	-211.34	155.99	3.86	17.83	0.7
	+A1/S1	30.38	20.01	-211.51	153.28	12.53	-42.77	0.4
	^<S2	28.67	24.03	-215.05	156.98	13.57	-37.06	0.3
	^<S3	26.4	30.18	-218.37	163.16	11.21	-29.57	0.2
^<S27		28.2	20.74	-213.11	112.64	3.75	51.21	0.7
	+A1/S1	30.56	18.87	-214.59	156.77	47.88	2.27	0.4
	^<S2	34.41	20.36	-218.3	142.37	48.43	0.68	0.3
	^<S3	39.05	21.4	-221.21	139.47	51.43	-2.7	0.2
	^<S4	41.85	22.77	-224.14	134.81	53.52	-5.64	0.2
	^<S5	44.06	24.17	-225.65	127	50.39	-13.55	0.2
^<S28		30.39	20.12	-215.21	106.75	4.35	11.27	0.6
^<S29		27.15	21.85	-222.37	-118.9	3.32	14.13	0.5
^<S30		24.46	25.2	-237.28	159.93	-15.47	22.28	0.4
^<S31		22.22	27.16	-241.65	153.75	-6.17	28.29	0.3

3d – Plant digitalization

Three-dimensional modeling of a woody plant by using an
electromagnetic digitizer

English summary

Master thesis written by:

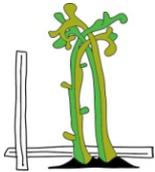
Bakk. techn. Walter Christian Scheinost

Advisors:

O.Univ. Prof. Dr.phil. Florin Florineth

Univ. Ass. DI Dr.nat.techn. Johann Peter Rauch

DI Clemens Weissteiner



Institute of Soil Bioengineering and Landscape Construction
Department of Civil Engineering and Natural Hazards
University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna



Vienna, September 2012

10.1.Introduction

Soil bioengineering techniques use living construction materials, like plants, for stabilizing and draining purposes. Whereas the supporting constructions are helping to achieve the planned functions in the first place, plants are capable to take over after developing their technical and biological properties and render obsolete the supporting structures (vide: FLORINETH, 2004, p.36 und 117; SCHLÜTER, 1996, p.15f; ZEH, 2007, p.46).

To investigate this dynamic process on the computer, it is necessary to record snap-shots of the different phases of development. It is indispensable to conduct the measurements without hinder the plants in their growth.

In 2006, the Institute of Soil Bioengineering and Landscape Construction started to investigate in this direction. By using a laser scanner, Soil Bioengineering structures had been measured and modeled. During this work it turned out, that the optical sensor was incapable of detecting occluded parts of the structures (vide: PFLEGERL, 2008).

Electromagnetic digitizers are not depending on optical sensors for measurement. Therefore they are able to detect and record even occluded parts of the plant.

The aim of this thesis is to create a virtual, three-dimensional, geometrical model of a plant by using an electromagnetic digitizer.

10.2. Definitions

For a better understanding of the described processes in the following chapters, some terms have to be clarified.

10.2.1. Notation of tree – axes

Due to the apical-meristems, plant-growth always takes place on top of already existing parts of the individual. This procedure causes a connection of all plant-parts with the stem (vide: GODIN, CARAGLIO, 1997, p.6).

As in BARTHÈLÈMY and CARAGLIO (2007) the notation of the plant-axes is based on the following rules (vide: BARTHÈLÈMY, CARAGLIO, 2007, p.382f.):

- The stem is designated as axis of 1st order. It is connected to the ground and represents the origin of 2nd order axes.
- 2nd order axes possess their origins on the stem and are the origins of 3rd order axes.
- In theory the occurrence of higher orders (4th order, 5th order,...) are possible. Their annotation follows the already existing rules

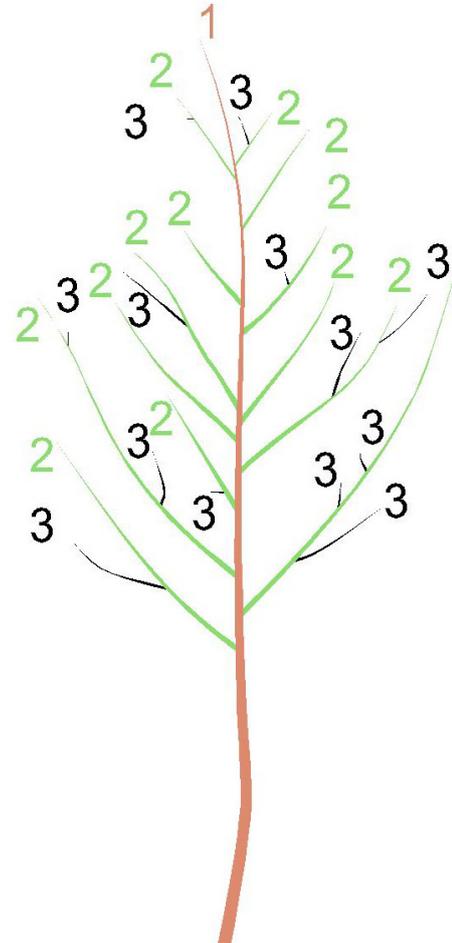


Figure 64: Schematic representation of the axes-orders. Brown – 1st order (stem); green – 2nd order; black – 3rd order.

10.2.2. Plant topology and mtg files

Plant topology describes the connection of the different plant constituents. Consecutive measurements, which are conducted at different points in time (e.g. before and after a vegetation period) usually show an increase of topological structures (modules) throughout the whole plant. The collected topological records of the same plant are necessary to create virtual growth models, but also are helpful to comprehend the procedure of plant-growth itself (vide: GODIN, CARAGLIO, 1997, p.3f).

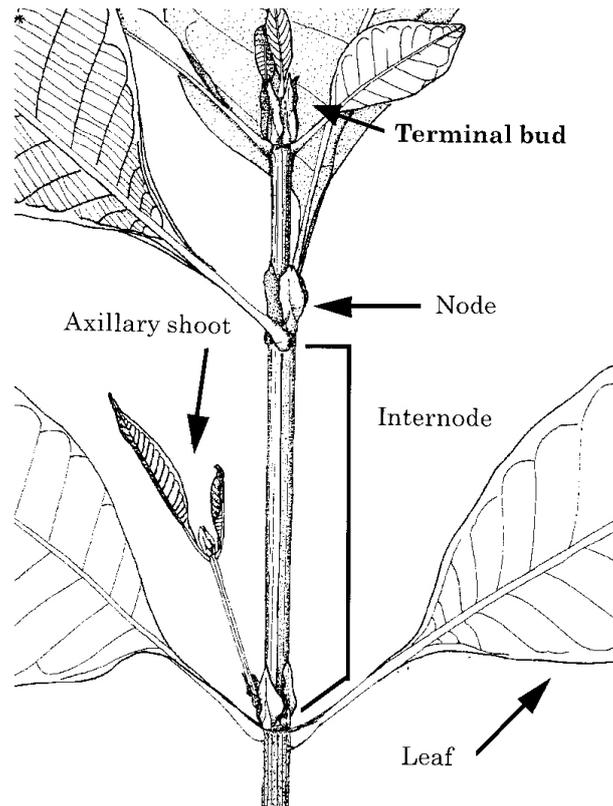


Figure 65: Connections of Nodes, Internodes, Shoots, Buds and Leaves (changed after GODIN, CARAGLIO, 1997, p.4).

- The **stem** and the **roots** of a plant are basically consecutive sequences of nodes and internodes, which are developed by the apical meristem (apex). The nodes / internodes are connected to each other by a **succession relation** (vide: GODIN, CARAGLIO, 1997, p.3).
- **Leaves, buds** and the subsequent developed **lateral branches** originate due to the activities of the lateral meristem. These components are connected with an axis of lower order by a **branching relation** (vide: GODIN, CARAGLIO, 1997, p.3f).

Based on these two relations described above, the definition of the following two different modularities is possible:

- **Nodal modularity:** The consecutive sequence of nodes and internodes
- **Axial modularity:** The connection of plant constituents based on a branching relation.

In theory other modularities based on climatic and genetic influences can occur. Even though these modularities should be considered during the measurement, they are not necessary to comprehend the principle of the growing processes of topological structures (vide: GODIN, CARAGLIO, 1997, p.4f).

A special way to record this kind of relationships was invented by GODIN and CARAGLIO. Their approach was to create a computer language, which stores the complexity of the modularities and the relations by using specific symbols. A complete list of topological features, combined with coordinates and other information, is called a Multiscale Tree Graph (mtg). The following symbols are used to describe a plant-topology (vide: GODIN, CARAGLIO, 1997, p.6, and GODIN, COSTES, SINOQUET, 1999, p.344):

- < **Succession relation (nodal modularity):** $a < b$ describes the development of the element b from an apical meristem belonging to element a .
- + **Branching relation (axial modularity):** $a + b$ describes the development of element b from a bud, which belongs to element a .
- / **Decomposition-symbol:** Only used, when multi-scale information of plants is available. a/b means that element b is a component of element a , or element a is a complex of element b recursively.

10.2.3. Euler angles

A 3d body's orientation is defined by using the three Euler angles:

AZIMUTH – ELEVATION – ROLL.

The value of the angles describes the rotation of axes around their original positions, which lie parallel to the reference coordinate system.

Ψ = Azimuth – Defines the rotation of the X- and Y-axis around the Z-axis. The axes' notation is now X' and Y' (vide: POLHEMUS, 2005, p.C-5).

θ = Elevation – Defines the rotation of the Z- and X' -axis around Y' , whereas Z turn into Z' and X' becomes X'' – its orientation is now parallel to the new, desired coordinate system (vide: POLHEMUS, 2005, p.C-5).

φ = Roll – Defines the rotation of the Y' - and Z' -axis around X'' . Now all axes from the reference coordinate system are parallel to the new coordinate system (vide: POLHEMUS, 2005, p.C-5).

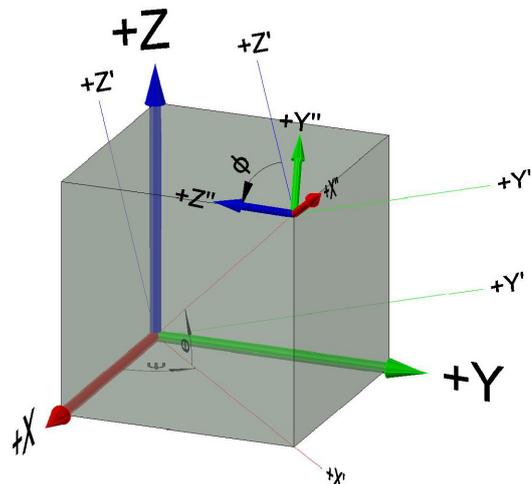


Figure 66: Euler angle - Definitions

10.3. Description of the used method

Electromagnetic digitizers initially were invented to record movements in three-dimensional, electromagnetic fields (EM-Fields) and transform them into virtual rooms (vide: KUIPERS, 1975, p.1; KUIPERS, 1977, p.8; RAAB et al., 1979, p.715).

Even though there are some different systems on the market, all electromagnetic digitizers basically have the same technical background and components (vide: NIXON et al., 1998, p.205; POLHEMUS, 2005, p.10, RAAB et al., 1979, p.709ff):

- **EM-Transmitter:** It contains three perpendicular coils, which, when electrically activated, produce the electromagnetic reference coordinates system. The transmitter has to remain in a fixed position during the whole measurement. Changing the orientation or the position of the transmitter only leads to reliable results, when using reference points to transform the new coordinate system correctly.
- **EM-Receiver:** It contains three orthogonal sensors, which detect the field-strengths of the three coils in the transmitter.
- **System Electronic Unit:** Excites the transmitter and the receiver with defined voltages and frequencies. It also converts the detected field strengths from the receiver in 3d coordinates and Euler angles and transmits the results to the computer.

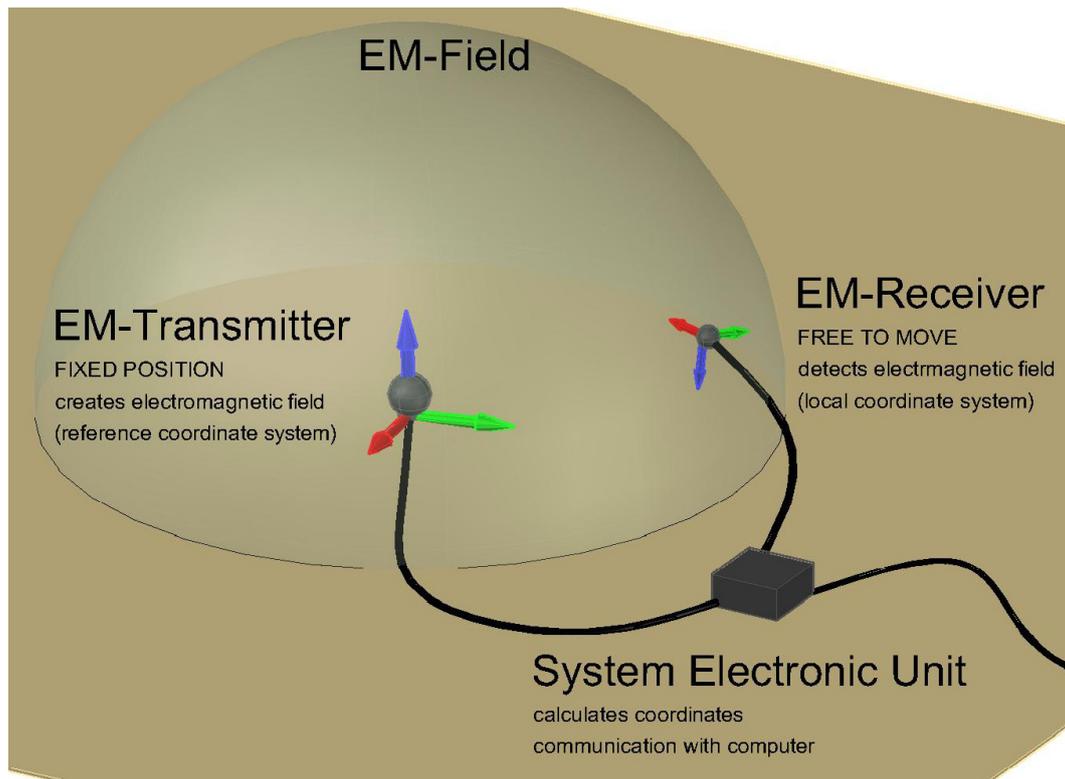


Figure 67: Principle of an electromagnetic digitizer

Since the system does not work with optical elements, the measurement will not be impaired by occluding parts of the test object. On the other hand the produced electromagnetic fields are influenced by ferromagnetic metals and electrical wires in its closer environment. Therefore disturbing elements shall be removed before starting the digitalization process (vide: POLHEMUS, 2005, p.12; NIXON et al., 1998, p.205f; RAAB et al., 1979, p.716; SINOQUET, RIVET, GODIN, 1997, p.267).

10.3.1. The measurement

The measurement takes place on the plant's surface. Beginning at the base, the operator moves upwards the stem and digitizes every point, where the plant's properties (declining diameter, change in orientation,...) change. When reaching a branching point, the operator has to define and digitize the basis of the branch of 2nd order and follow it to the tip, by recording every point of interest as well. After the operator has reached the tip of the branch, the measurement continues at the stem (vide: SINOQUET, RIVET, 1999, p.266).

The result of the measurement is a list with the three-dimensional coordinates, the Euler angles and, if recorded, the diameters of the stem in every digitized point. Since the measurement takes place on the plants surface, the model has a constant error of half the diameter in several directions, depending on the location of measurement. Therefore it is advised to recalculate the coordinates to the center of the stem by using the Euler angles and the diame-

ters. A mathematical explanation of this process is described in chapter 5.4 Nachbearbeitung - Koordinatentransformation.

By using special programs (in our case Piaf Digit) it is also possible to add information of the correct topological notation to every point and create an mtg-file to successfully establish a virtual model (vide: DANJON, REUBENS, 2007, p.10; DONÈS, ADAM, SINOQUET, 2006, p.15ff).

10.3.2.The modeling

The recorded points will now be imported into a 3d-program. After connecting the points, cone-frustums, defined through the distance of two points and the diameters, rebuild the parts of the plant and produce the virtual model.

10.3.3.Accuracy, and Errors

Under controlled environmental conditions the theoretical error is about 0,08 mm. According to THANISAWANYANGKURA et al. (1997) the practical error is approximately 1 cm during field measurements (vide: POLHEMUS, 2005, p.11; SINOQUET et al., 1998, p.204; THANISAWANYANGKURA et al., 1997, p.12).

Due to the sensitivity of electromagnetic fields regarding field disturbing objects in the closer environment, it is advised to evaluate the measurement conditions to provide reliable results. Two types of errors can occur during an electromagnetic digitalization process (vide: DAY et al., 1998, p.959; NIXON et al., 1998, p.206f, STRAUSS, 2004, p.40):

- **Static errors:** They are produced by ferromagnetic objects in the closer environment. These objects cause a bending distortion to the electromagnetic field. This effect falsifies distance measurements.
- **Dynamic errors – noise:** This type of error is created by eddy currents, produced in electric conductors. Measurements in the same position will have varying coordinates if the system is influenced by dynamic errors.

10.3.4.The result

Based on the fact that the digitizing method is not influenced by occluding parts of the plant and the precision lies within 1 cm, this method is able to produce reliable, virtual copies of a real plant (vide: PREUKSAKARN et al., 2010, p.15).

10.4.Differences to other methods

The following section compares the capabilities of electromagnetic digitizers to image based methods and laserscanning, two other common ways for 3d-measurements of plants.

10.4.1.Image based methods

Image based methods use passive optical sensors (photo cameras) to provide 2d images containing specific color values in each pixel (vide: RECHE, MARTIN, DRETTAKIS, 2004, p.722; REMONDINO, 2011, p.1106).

Depending on the modeling method, several photographs (10-30) from different angles (120-360° around the plant) are needed (vide: RECHE, MARTIN; DRETTAKIS, 2004, p.722; TAN et al., 2007, p.1f; TENG, CHEN, 2009, p.303f).

For modeling, first the different photographs have to be connected using overlapping areas within the photographs. After the visual branches were rebuilt, the occluded branches have to be calculated by using specific computer algorithms (e.g. based on L-systems) (vide: KANG, 2011, p.351; LIU, J. et al, 2010, p.2f; NEUBERT, FRANKEN, DEUSSEN, 2007, p.1f; RECHE, MARTIN, DRETTAKIS, 2004, p.721; TAN et al., 2007, p.3ff ;TEOBALDELLI et al., 2007, p.1083).

Pro

This method's advantages lie in the possible height of the modelled plant, which is approximately 30 m. Also the number and time of the involved persons for taking the pictures (1 person, approx. 10 min) as well as for modeling (10 to 120 min) is low, regarding the other two described methods (vide: QUAN et al., 2006, p.603; TAN et al., 2007, p.5; TENG, CHEN, 2009, p.306; TEOBALDELLI et al., 2007, p.1085).

Average

For better results during the modeling process it is advised, that the plant has a monotone, distinctive background. Climatic impacts, mostly wind, can also influence the result of the model, because the registration process becomes more difficult. The error of the model lies in the range of several centimeters. Also the amount of the occurring data during the measurement and modeling process (several MB) can be considered as average (vide: TEOBALDELLI et al., 2007, p.1081; PFEIFER, GORTE, WINTERHALDER, 2004, p.114f; XU, GOSSET, CHEN, 2007, p.1).

Contra

Due to the use of optical sensors, this method is not able to directly 'see' and therefore measure the occluded parts of the plant. Computer algorithms help reconstructing those hidden objects, but irregularities of the branches cannot be modeled (vide: TAN et al., 2007; TEOBALDELLI et al., 2007; XU, GOSSET, CHEN, 2007).

10.4.2.Laserscanning

This method uses active optical sensors to detect the different parts of the plant. The result of the measurement is an image containing information of depth depicted as pixels in different shades of grey (vide: PFLEGERL, 2008, p.37; REMONDINO, 2011, p.1106f).

To be able to model a mostly reliable virtual plant, 3 to 5 measurements, if possible around the plant, are considered as sufficient. The modeling process is analogue to the image based method. After registering the measurement results, the visible followed by the occluded parts get modeled (vide: CÔTE et al., 2011, p.763ff; NEUBERT, FRANKEN, DEUSSEN, 2007, p.2; PFEIFER, GORTE, WINTERHALDER, 2004, p.116f; PFLEGERL, 2008, p.38 and 53f; PREUKSAKARN et al., 2010, p.15; TEOBALDELLI et al., 2007, p.1083ff; XU, GOSSET, CHEN, 2007, p.3ff).

Pro

Provided there is enough space and a clear view of to the object, this method is capable to detect a plant with a height up to approximately 30 m (vide: TEOBALDELLI et al., 2007, p.1085).

Average

The measurement (2 persons need approximately 180 minutes for setup and measurement itself) and the modeling (from 10 minutes up to 31 hours), as well as the environmental and climatic dependency (no wind, no rain) are considered as average (vide: CÔTE et al., 2009, p.774; PFEIFER, GORTE, WINTERHALDER, 2004, p.115; PFLEGERL, 2008, p.24; TEOBALDELLI et al., 2007, p.1082; XU, GOSSET, CHEN, 2007, p.13).

Contra

As stated during the description of the image based methods, optical sensors are incapable to detect occluded parts of the plant and therefore influence the precision of the model. Also the huge amount of data (several 100 MB, up to GB) is a disadvantage of this method (vide: TAN et al., 2007; TEOBALDELLI et al., 2007; XU, GOSSET, CHEN, 2007).

10.4.3. Electromagnetic digitizer

Pro

The capability to record occluded objects is one of the main advantages of this method. Also the time needed for modeling and the low amount of occurring data can be considered as positive. Even though the accuracy highly depends on the operator, 3d models based on electromagnetic devices are used for evaluating the models of the other methods. Therefore this method also is considered as an advantage compared to the other methods (vide: PREUKSAKARN et al., 2010, p.15; TAN et al., 2007; TEOBALDELLI et al., 2007; XU, GOSSET, CHEN, 2007).

Average

Based on the fact, that every point has to be digitized manually, the measurement of a plant with a height of 4 meters takes approximately 1 hour and will increase dramatically, when a larger plant has to be recorded.

Con

The main disadvantages of this method lie in the high influence of the environment as well as the incapability to record plants, which are higher than 4 meters (operational radius) by using only one transmitter position.

Method \ Criteria	Image-based	Laserscan	Electromagnetic fields
size of the object	~ 30 m	~ 30 m	~ 4 m (bis 8 m)
environmental effect	medium	medium	large
time for setup & measurement x persons involved	~ 10 min x 1	~ 180 min x 2	~ 1 h (up to 4 weeks*) x 2
prone to occlusion	yes	yes	no
time for modeling	~10 up to 120 min	~10 min up to 31 std	~ 5 min
range of accuracy	cm	cm	cm
amount of data	MB	MB - GB	kB
* depending on the plant-size			

Table 13: Comparison of the described methods

10.5. Modeling and visualization

After creating an mtg file with the correct notation of the plant's topology, the XYZ-coordinates of every point and the diameters, we used the program **VisuAlea**, which is part of the project **OpenAlea** (Atelier Logiciel en Ecophysiologie et en Architecture 3d des plantes), launched by a French research community³, to build the three-dimensional model.

10.5.1. VisuAlea

VisuAlea consists of several modules for modeling and visualization purposes. Widgets contain specific program-codes, written in Python, to obtain the desired results. Most widgets possess input- and output nodes, to transfer the computed results to other widgets, or start the modeling process. Furthermore a python interpreter helps the user to detect possible errors during the visual programming, or to define specific parameters manually (vide: PRADAL et al., 2007, p.25-1ff).

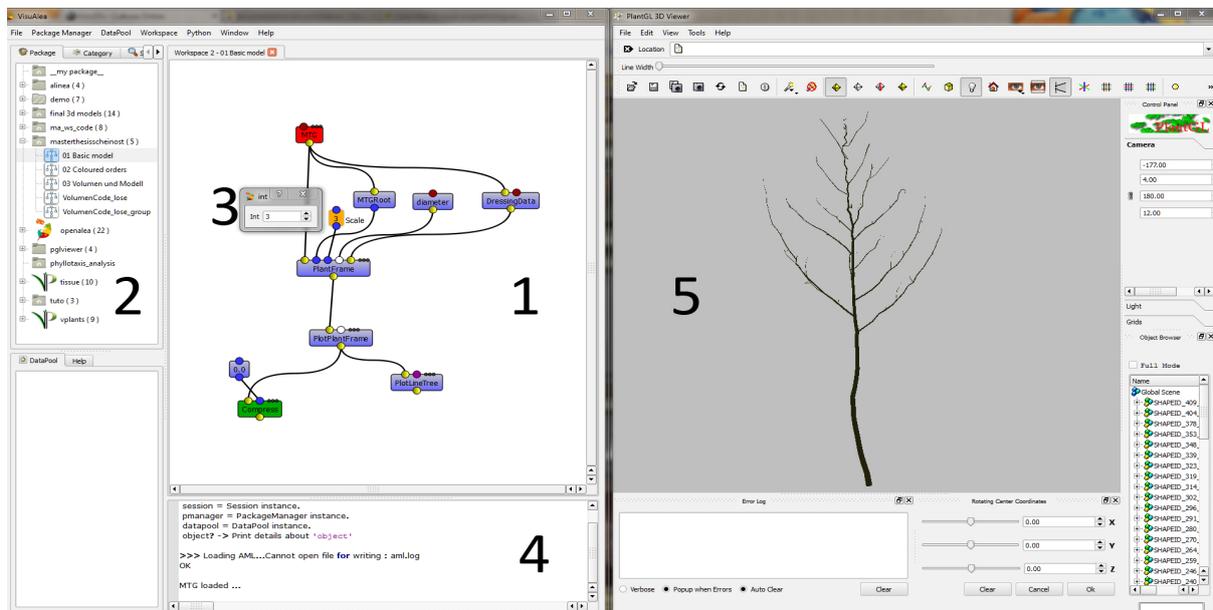


Figure 68: VisuAlea GUI (1); Package manager (2); Widgets (3) Python-Interpreter (4); 3d-Viewer (5).

³The involved institutes are:

INRIA – françaisch nationales Forschungsinstitut für Informatik und Automatik (L'Institut national de recherche en informatique et en automatique);

CIRAD - Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement

INRA - françaisch nationales Forschungsinstitut für Landwirtschaft (Institut national de la recherche agronomique)

AGROPOLIS FOUNDATION

10.6. The Results

The following chapter contains the presentation and analysis of the results based on the measurements conducted with a POLHEMUS Fastrak, an electromagnetic digitizer.

Following steps had to be conducted successfully to provide a reliable result:

- System setup and evaluation of the environment to define the errors.
- Plant-digitalization, by using the POLHEMUS Fastrak and PiafDigit, a program designed to visualize the recorded points with their topological connection and adding specific information (diameter) to the coordinates. Result: mtg-file containing the topological properties, including the coordinates of distinctive plant constituents.
- Transformation of the coordinates and implementing the recalculated mtg-file in VisuAlea. Result: Three-dimensional plant model containing visual information of the stem-/ branch-diameters, or orders of the plant constituents.

The whole process from the system-setup to the presentation of the model took about 60 minutes. The following table shows the time-distribution of all the conducted steps:

setup	15 minutes
measurement	40 minutes
post-processing and modeling	5 minutes
total	60 minutes

Table 14: Duration of the different processes

10.6.1. Three-dimensional plant model

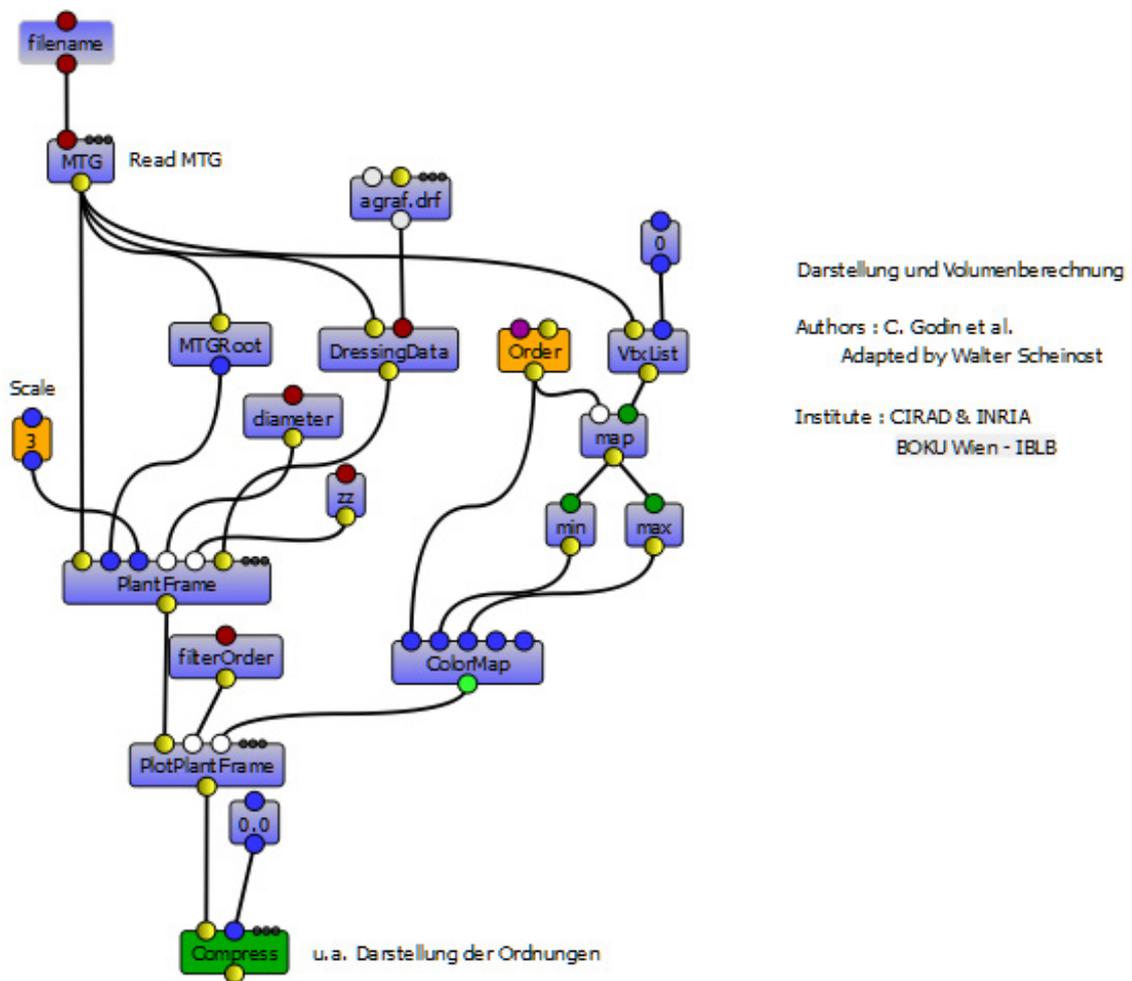


Figure 69: VisuAlea dataflow to visualize the plant model

Figure 69 shows the dataflow to create an upright, three-dimensional model with colored branch-orders of a digitized plant. The widget 'filename' on top of this dataflow allows the operator to load the recorded mtg-file, whereas the widget 'Compress' starts the modeling process and shows the virtual model in the PlantGL-viewer.

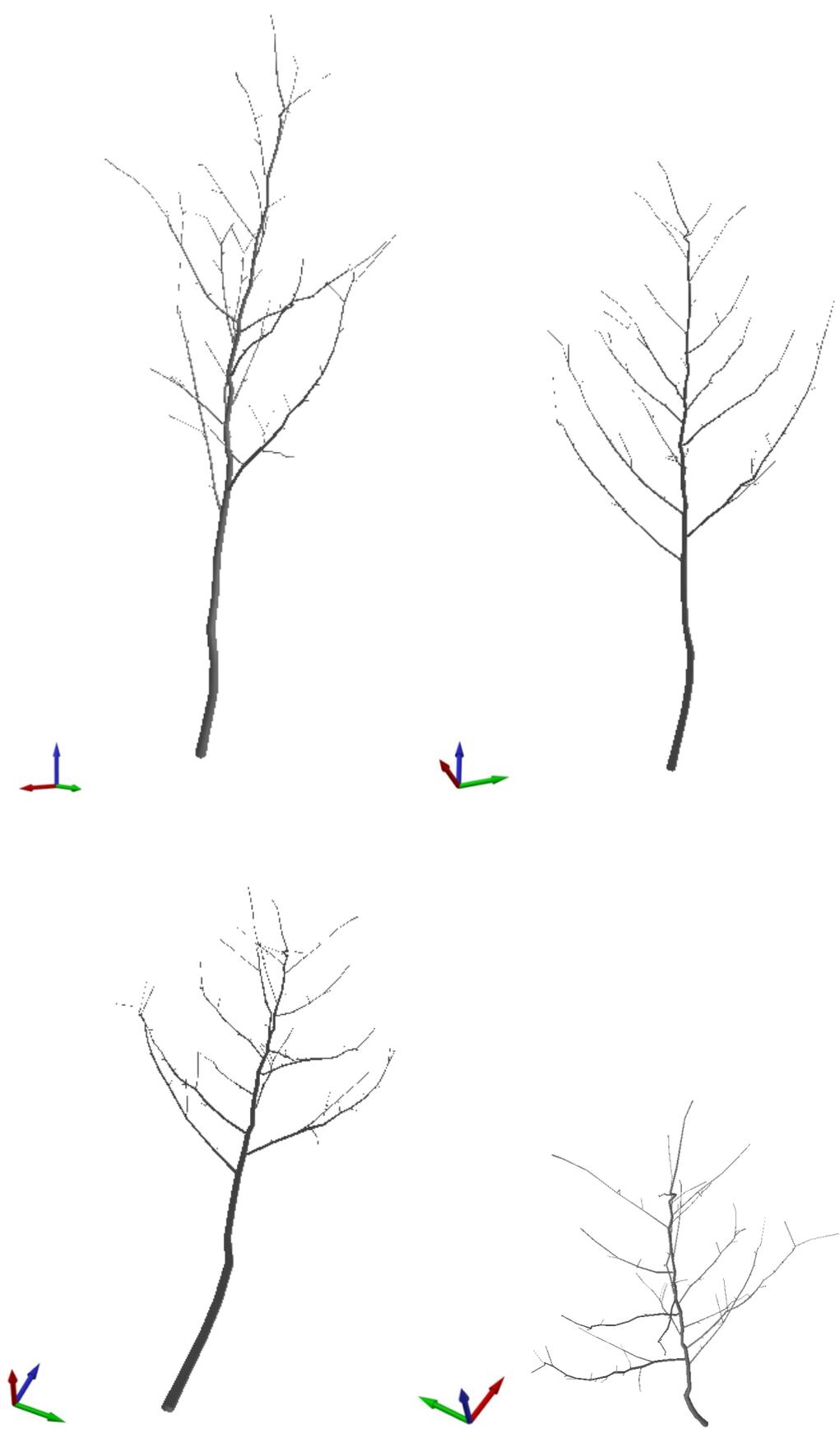


Figure 70: Three-dimensional model, viewed from different perspectives

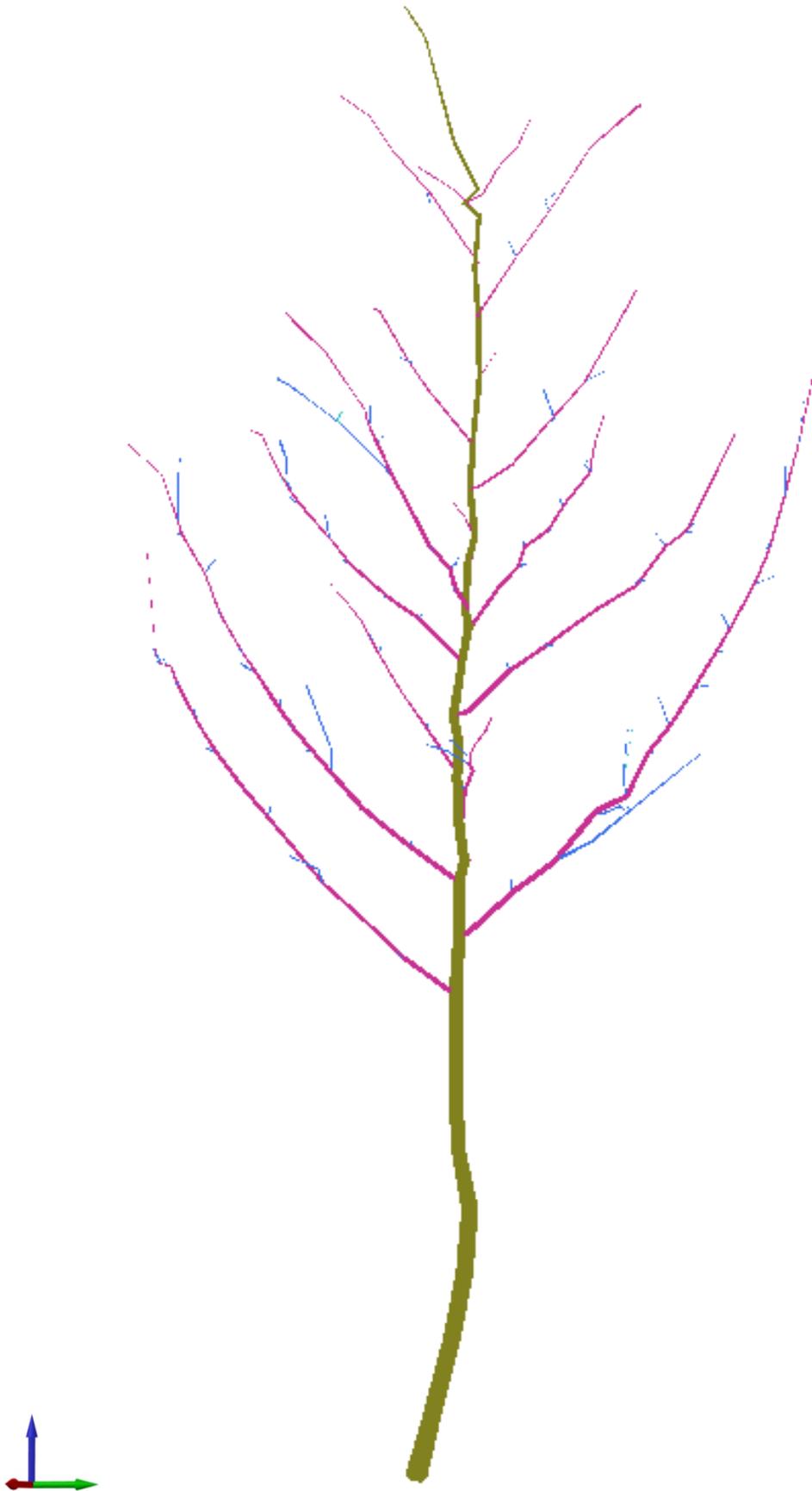


Figure 71: Plant model depicting the different orders – Green: Stem (Axis 1st order); Magenta: 2nd order branches; Cyan: 3rd order branches

10.6.2. First steps – definition of the tolerated error and the digitizing resolution

After the first measurements had been successful, we tried to optimize the process. Therefore we experimented with different levels of accuracy to minimize the operating time. Representative for this kind of work, the measurements with the coarsest and the finest resolution will be compared. Basically the difference between the two following models is the number of recorded points:

- **Coarse model** (Figure 72 - left): Here we only considered the branches of the 1st and 2nd order. Branches with higher orders were neglected. The branches were defined only by their points at the base and the tip. Within 10 minutes we digitized the whole plant, by recording 47 points along the surface.
- **Exact model** (Figure 72 – right): During this measurement points at all parts which had discernible changes in diameters or orientations were recorded. The measurement consists of 350 points and took about 40 minutes.



Figure 72: Comparison of different levels of accuracy; left: coarse measurement, 47 records; right: exact measurement, 350 records

The comparison of the two images shows significant differences between the two models. Whereas the left picture shows a representation of a simplified tree, the right figure depicts a good representation of the digitized plant. Even though the process of digitizing with a higher resolution consumes more time, the results are more satisfying. Therefore all measurements were conducted with high resolutions.

10.6.3. Comparison: Virtual model – real plant



Figure 73: Optical comparison between the virtual and the real plant – Measurement: April 2011

Even though the small branches on top of the plant show some differences regarding length and orientation, the visual comparison between the virtual model and the real plant shows a good match between the two figures.

The inaccuracy doesn't necessarily originate from a malfunction of the electromagnetic digitizer. Other possibilities to cause such differences are:

- The **tolerated error** was set too high
- Inaccuracies through the **operator**
- **Sensitive adjustments of the perspective** in VisuAlea
- Changes of locations and orientations due to **wind** gusts

10.6.4. Depiction of the diameter in classes

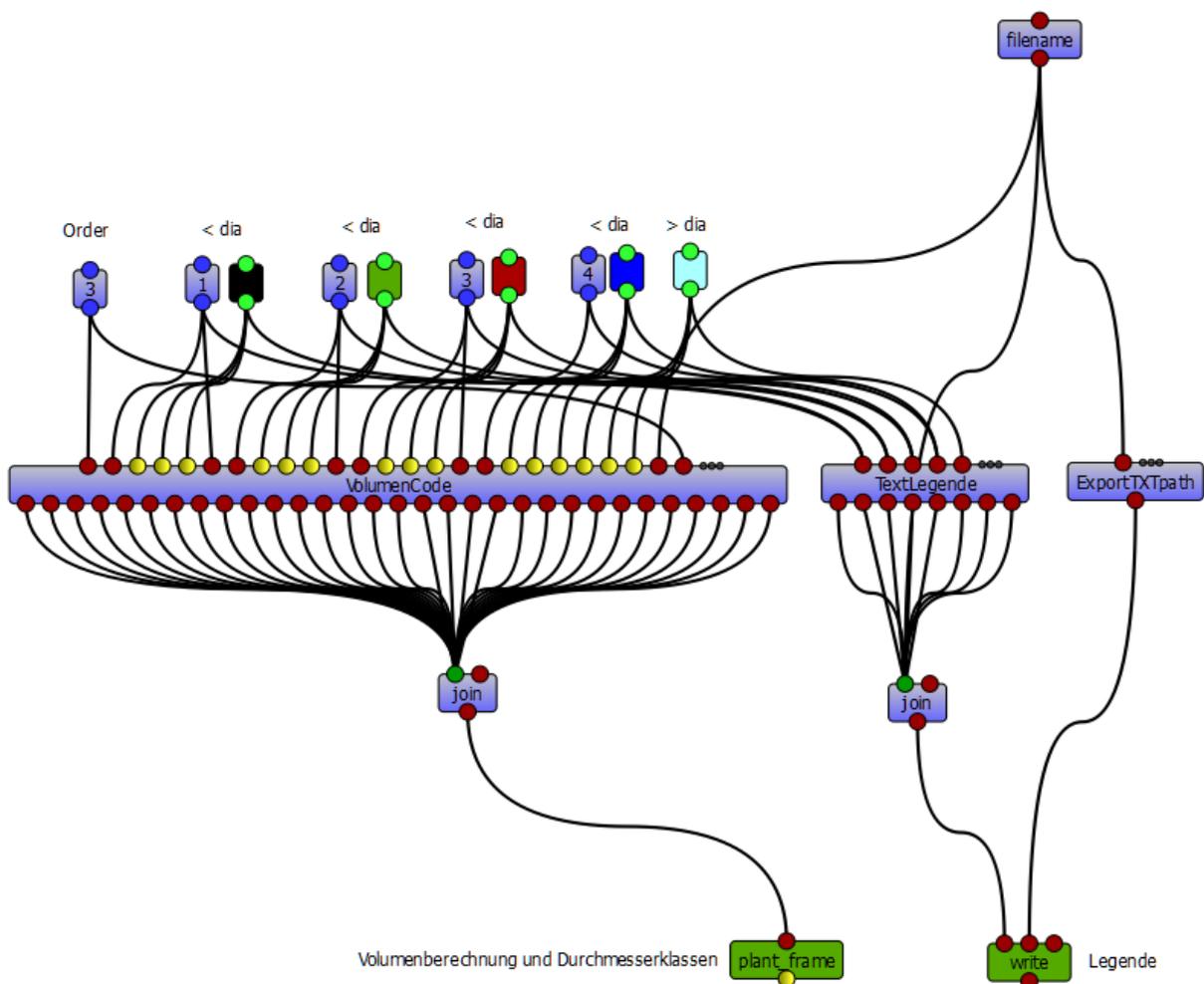


Figure 74: VisuAlea dataflow to calculate the plant's volume, show the different diameter classes in specific colors and creating a legend

Figure 74 shows the dataflow to create the plant model with the colored classes of the diameters. The widget 'VolumenCode' contains the fixed part of a Python code, which translates the coordinates with their specific diameters in calculable cone frustums (provided by Cristophe Godin). By changing the values of the 'widgets' on top, the classes and their respective colors can be adapted.

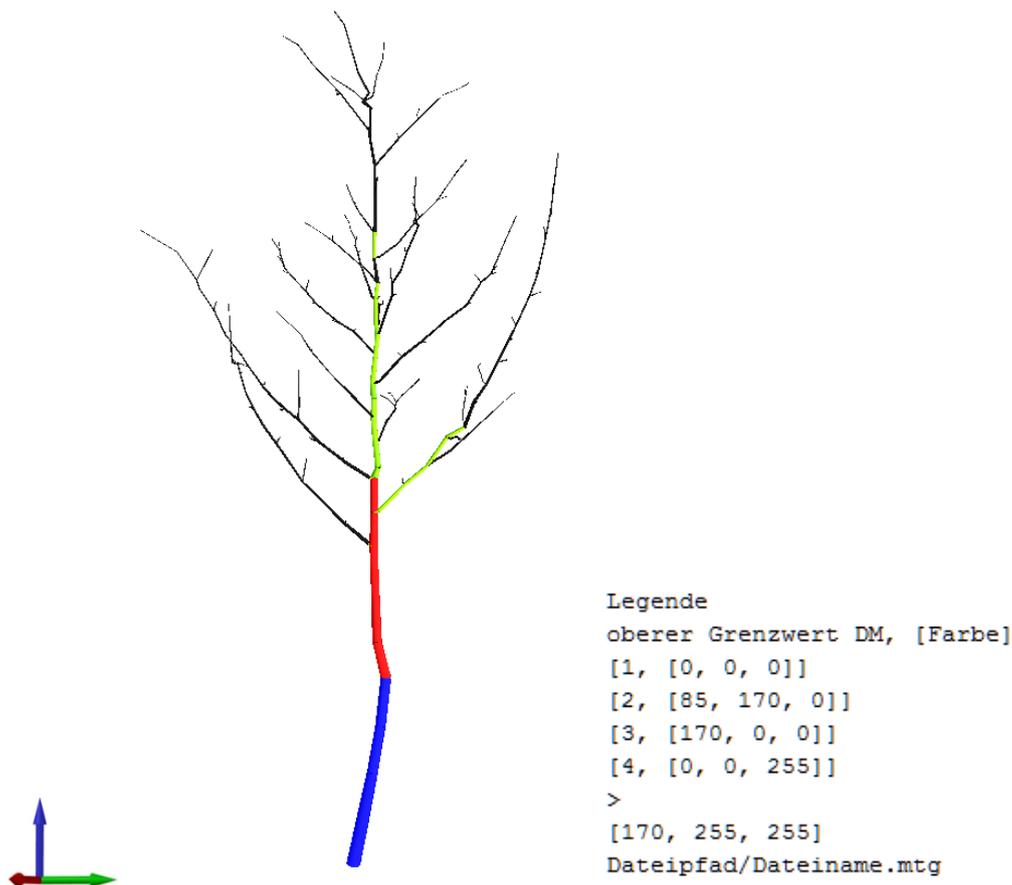


Figure 75: Result after activating the dataflow: Specific colored classification of the stem diameters including the color-code description using RGB-values

10.6.5. Development of the plant within one vegetation period

To investigate the development of the plant within one vegetation period, two digitalizations within a one-year's distance were conducted.

10.6.5.1. Measurement April 2010

The first measurement took place in the yard of the Schwackhöfer-Haus on the campus of the University of Applied Life Sciences on April 19th 2010. The evaluation of the environment showed, that inside a radius of 3,7 meters all measurements had an accuracy within the tolerated difference, which was 3 cm. The plant has been digitized with 350 points. A first visual inspection of the model shows some false orientations of the small branches on top of the plant.

10.6.5.2.Measurement April 2011

The second measurement took place in the institute’s experimental garden in Eßling, Vienna, on April 29th 2011. 341 points were recorded here.

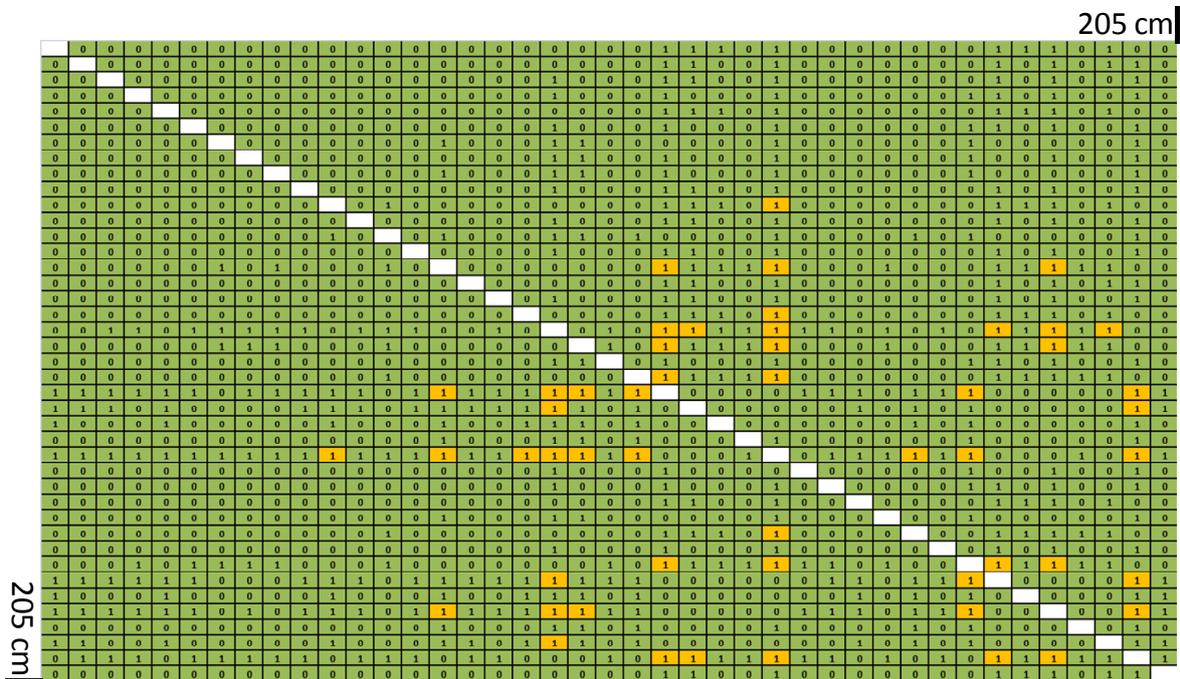


Figure 76: Excerpt of the environmental evaluation, measurement 2011

Figure 78 depicts an excerpt of the environmental evaluation in 2011. Even though in some points the calculated errors exceed 1 cm (yellow), the maximum error within a 4 m radius was under 3 cm and was therefore more reliable than the measurement in 2010.

10.6.6. Differences of the diameters

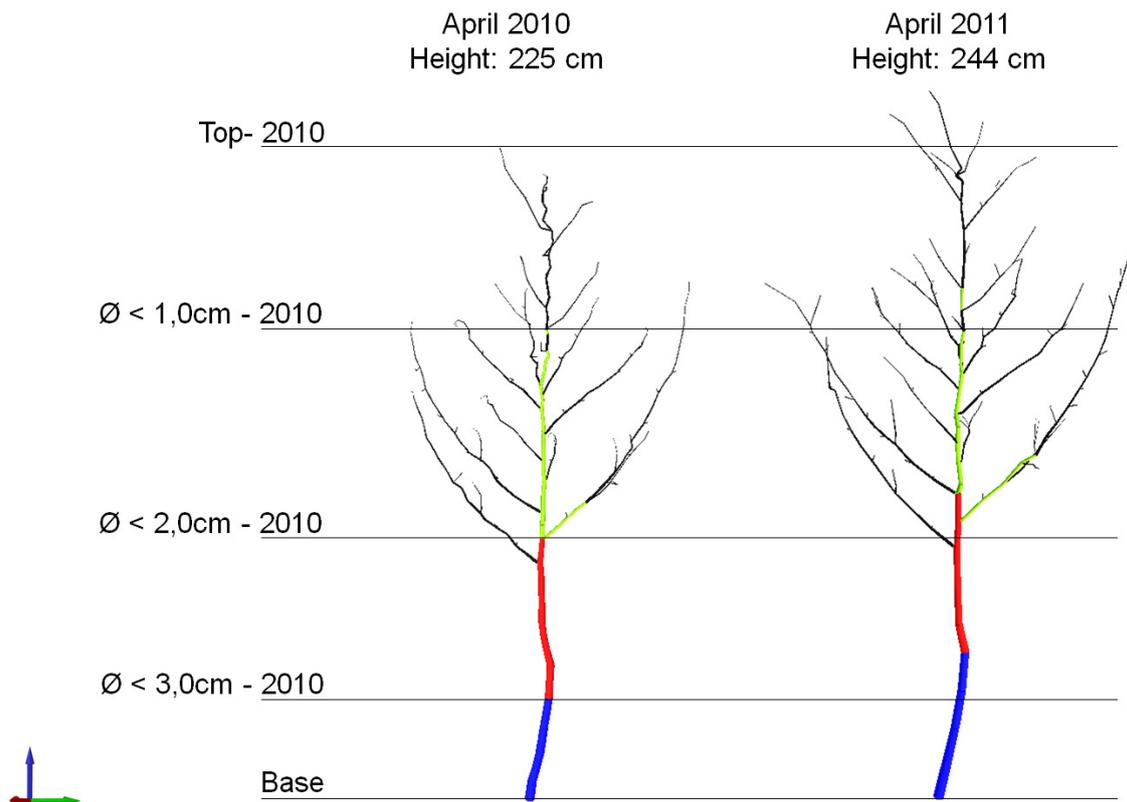


Figure 77: Side-by-side comparison of the two measurements (April 2010-left and April 2011-right). Diameter-classification: $\varnothing < 1,0\text{ cm}$ – black; $1,0 - 1,9\text{ cm}$ – green; $2,0\text{ cm} - 2,9\text{ cm}$ – red and $\varnothing \geq 3,0\text{ cm}$ – blue.

Generally, the appearance of the whole plant changed within one vegetation period. The most obvious differences between the two models of 2010 and 2011 are at the blue section ($\varnothing \geq 3,0\text{ cm}$) at the bottom of each plants as well as in the red section ($\varnothing: 2,0 - 2,9\text{ cm}$). Also at 2nd order branches a secondary growth is distinguishable. The estimation of the height was calculated manually, by using the coordinates of the points on the base and the top of the plant. The difference is 19 cm.

Even though both plants have a strong visual familiarity with the real plant, the measurement of 2010 seems to be corrupted. An evidence for this conclusion is the part on top of the model from 2010. Small changes in the orientation indicate a spoiled measurement.

10.6.7. Increase of volume

Besides the investigation of growing parts of the plants with regard to their stem- and branch-diameters, a calculation of the total plant volumes was carried out.

The results are as follows:

	volume	gain
model April 2010	910 cm ³	-
model April 2011	1040 cm ³	14,29%

Table 15: Increase of volume between 2010 and 2011

The comparison of the calculated volumes shows that the volume of 2011 was approximately 14% higher than the volume from 2010. However, an evaluation of the calculation process led to the conclusion, that the results are not reliable.

10.6.7.1. Evaluation of the calculation method



Figure 78: Overlay: Virtual and real branch

To evaluate the used method, a reference model with a known volume had to be created. Therefore a dry branch (length: 1 meter) was digitized in 88 points in the yard of the Schwackhöfer-Haus.

After the modeling and the calculation of the volume had been conducted, the comparison showed a difference of 21% to the real branch. An examination of the virtual model showed overlapping parts of the frustums in the branching points all over the model (vide: Figure 79).

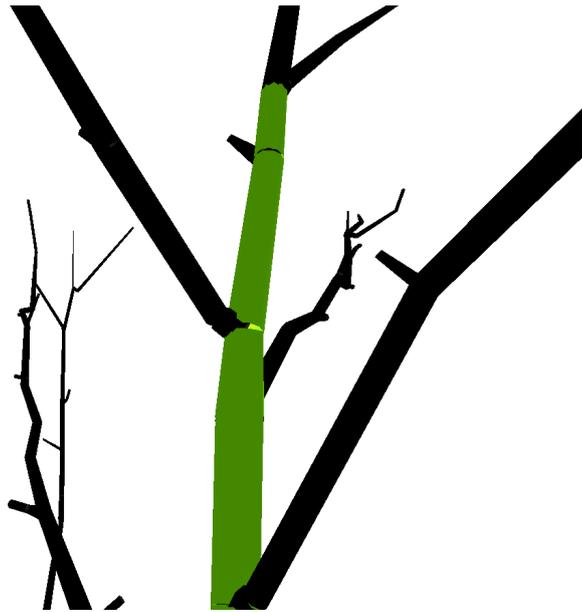


Figure 79: Overlapping cone-frustums

To eliminate this factor, the three-dimensional coordinates were implemented in AutoCAD with their specific diameters. After the frustums had been merged to one 3d-model without overlapping parts, the difference to the real branch was at 14%.

	volume	deviation
real branch	241 cm ³	0%
VisuAlea	291 cm ³	21%
AutoCAD	274 cm ³	14%

Table 16: Comparison of different calculation methods

Possible reasons for the differences are:

- The tolerated error was too high
- Environmental effects, since the measurement was conducted in the yard of the Schwackhöfer-Haus.
- Inaccurate measurements or entries of the stem-diameters.

10.7. Conclusion

Compared to other – optical - methods, electromagnetic digitizers are able to record visible and occluded objects and give sufficient data to create realistic but, due to environmental and operational restraints, not exact models of 3d plants. The simultaneous recording of the topological constituents also provides another tool to investigate the plant development during a defined period of time. The manual measurement aside, all the modeling and visualization processes were automated.

By comparing two measurements, conducted at the beginning of two consecutive vegetation periods, the development of a *Sorbus aucuparia* was investigated. The results show, that the plant increased height (plus 19 centimeters) as well as volume (plus 14,29%). Even though an evaluation of the calculation of the volume shows restraints in the accuracy of the used method due to overlapping branch and stem constituents, a visual comparison of the two models also shows an increase of branches of higher orders as well as the specific diameters.

In theory also an investigation of the root development should be possible.

Based on the work and capabilities of this method, it is legitimate to think about deepening the process to create more realistic models, which probably are able to calculate the development at different points in time or investigate the reaction of the plant to forces (e.g. wind).

From the current point of view, VisuAlea does not provide a possibility to calculate the plant's development at different scales, like specific branching orders. Therefore collaboration with the program developers would be helpful to achieve these goals.