

BACHELORTHESIS  
Adrian Helberg

# Template-basierte Synthese von Verzweigungsstrukturen mittels L-Systemen

---

FAKULTÄT TECHNIK UND INFORMATIK  
Department Informatik

Faculty of Computer Science and Engineering  
Department Computer Science

Adrian Helberg

# Template-basierte Synthese von Verzweigungsstrukturen mittels L-Systemen

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung  
im Studiengang *Bachelor of Science Angewandte Informatik*  
am Department Informatik  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer: Prof. Dr. Philipp Jenke  
Zweitgutachter: -

Eingereicht am: 14. Februar 2021

**Adrian Helberg**

**Thema der Arbeit**

Template-basierte Synthese von Verzweigungsstrukturen mittels L-Systemen

**Stichworte**

Computergrafik, prozedurale Modellierung, 3D Generierung, L-Systeme, formale Grammatik, prozedurale generierung

**Kurzzusammenfassung**

Hier kommt das Abstract hin . . .

**Adrian Helberg**

**Title of Thesis**

Template-bases synthesis of branching structures using L-Systems

**Keywords**

Computer graphics, Procedural modeling, 3D generation, L-Systems, formal grammars, procedural generation

**Abstract**

The abstract belongs to here . . .

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>vi</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>vii</b>
<b>Abkürzungen</b>	<b>viii</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>ix</b>
<b>Listings</b>	<b>x</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung . . . . .	2
1.2 Ziele . . . . .	3
1.3 Methodik . . . . .	3
1.4 Aufbau . . . . .	4
<b>2 Grundlagen</b>	<b>6</b>
2.1 Grundbegriffe . . . . .	6
2.2 Grundlegende Arbeiten . . . . .	7
2.2.1 Softwaretechnik . . . . .	7
2.3 Verwandte Arbeiten . . . . .	11
<b>3 Konzepte</b>	<b>12</b>
3.1 Probleme & Lösungsansätze . . . . .	12
3.2 Softwarearchitektur . . . . .	12
3.2.1 Einführung und Ziele . . . . .	12
3.2.2 Kontextabgrenzung . . . . .	13
3.2.3 Lösungsstrategie . . . . .	15
3.2.4 Bausteinsicht . . . . .	15
3.2.5 Laufzeitsicht . . . . .	17

3.2.6	Verteilungsicht . . . . .	17
3.2.7	Konzepte . . . . .	18
<b>4</b>	<b>Implementierung</b>	<b>23</b>
4.1	Pakete? . . . . .	23
4.2	Entscheidungen . . . . .	24
4.3	Technologien . . . . .	24
4.4	Hardware . . . . .	25
<b>5</b>	<b>Evaluierung</b>	<b>26</b>
5.1	Testumgebung . . . . .	26
5.2	Beobachtungen & Ergebnisse . . . . .	26
5.3	Diskussion und Bewertung . . . . .	26
<b>6</b>	<b>Ausblick</b>	<b>27</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>28</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>30</b>
	<b>Glossar</b>	<b>32</b>
	<b>Selbstständigkeitserklärung</b>	<b>33</b>

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Systemarchitektur . . . . .	5
3.1	System und Systemumgebung . . . . .	13
3.2	Technische Interaktion zwischen System und Systemumgebung . . . . .	14
3.3	Subsysteme mit fachlichen Abhängigkeiten . . . . .	16
3.4	Subsystem GUI . . . . .	16
3.5	Laufzeitsicht . . . . .	17
3.6	Infrastruktur Windows-PC . . . . .	17

# Tabellenverzeichnis

# Abkürzungen

**HAW** Hochschule für Angewandte Wissenschaften.



# Symbolverzeichnis

$\Omega$  unit of electrical resistance.

# Listings

3.1	Erstellen einer Verzweigungsstruktur . . . . .	19
3.2	Inferieren eines L-Systems aus einer Baumstruktur . . . . .	20
3.3	Erstellen eines kompakten L-Systems mit Gewichtung $w_l$ . . . . .	21
3.4	Kostenfunktion $C_i$ mit Gewichtung $w_l$ . . . . .	21
3.5	Längenfunktion $L$ für Grammatiken . . . . .	21
3.6	Kostenfunktion $C_g$ mit Gewichtung $w_0$ . . . . .	22
3.7	Generalisieren eines L-Systems mit Gewichtung $w_0$ . . . . .	22

# 1 Einleitung

Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW)  $\Omega$  HAW Hamburg (Damit das glossar keine fehler schmeißt)

Effizientes Objekt design und -modellierung sind entscheidende Kernkompetenzen in verschiedenen Bereichen der digitalen Welt. Da die Erstellung geometrischer Objekte für Laien unintuitiv ist und ein großes Maß an Erfahrung und Expertise erfordert, ist dieses stetig wachsende Feld für Neueinsteiger nur sehr schwer zu erschließen. Die Forschung liefert hierzu einige Arbeiten zur prozeduralen Modellierung, um digitale Inhalte schneller und automatisiert zu erstellen. Gerade wenn es um die Darstellung natürlicher Umgebung geht, ist die Erstellung von ähnlichen Objekten, wie zum Beispiel verschiedene Bäume derselben Gattung eines Waldes, ein schwieriges Problem. Kleine Änderungen in prozeduralen Systemen können zu großen Veränderungen der Ergebnisse führen. Darum beschäftigt sich die inverse prozedurale Modellierung unter anderem mit dem Inferieren von Regeln und Mustern aus gegeben Objekten, um diese nach bestimmten Regeln zu modellieren. Ein wichtiges Werkzeug hierbei ist die Verwendung formaler Grammatiken als fundamentale Datenstruktur der Informatik, um Strukturen zu beschreiben. Eine spezielle Untergruppe sind die L-Systeme, die häufig bei der Beschreibung von Verzweigungsstrukturen und Selbstähnlichkeit zum Einsatz kommen.

Diese Arbeit soll sich mit der Erstellung eines prozeduralen Systems zur Synthese von Ähnlichkeitsabbildern beschäftigen. Hierzu soll über eine Benutzerschnittstelle eine Struktur erzeugt werden, aus der ein parametrisiertes L-System inferiert werden kann, das dann zur Generierung von ähnlichen Strukturen genutzt werden kann.

### 1.1 Problemstellung

Mit der Digitalisierung der Welt steigt auch der Bedarf an digitalen Inhalten. Um eine erhöhte Quantität dieser Inhalte liefern zu können, werden Methodiken und Algorithmen gesucht, die die Erstellung vereinfachen. Während Methodiken zur Kodifizierung bestimmter Strukturen diese für die prozedurale Modellierung nutzbar machen, findet das Ableiten von Regeln Anwendung in der inversen prozeduralen Modellierung.

Weiter steigt mit dem digitalen und naturwissenschaftlichen Fortschritt die Anwendung immer komplexerer Strukturen aus der Natur. Deshalb werden allgemeingültige, vielseitig anwendbare Algorithmen gesucht, die bestimmte natürliche Eigenschaften herausarbeiten, um diese für die (inverse) prozedurale Modellierung zur Verfügung zu stellen.

Beschreibung eines Forschungsproblems, das ich mit der Bachelorarbeit lösen möchte.

Digitlisierung der Welt → kompliziertere Strukturen kodifizieren (Regeln ableiten) → künstliche Intelligenz

- Das Problem ist die Erstellung eines Systems zur Erzeugung von ähnlichen Strukturen aus einer Basisstruktur
- Der Sprung der prozeduralen Modellierung zur inversen prozeduralen Modellierung, also die Vereinfachung von schwierigen, schwer zu kontrollierenden prozeduralen Regeln zu einem „Reverse Engineering“-Ansatz (Automatisierung)

Wo besteht das Problem?

- (Inverse) prozedurale Modellierung ist ein schwieriges Problem der Informatik → Quellen sichten und begründen warum das so schwierig ist ([? ])
- Prozedurale Regeln sind schwer zu verstehen und kontrollieren → Zugang, Klarheit schaffen, wie man an solche Fragestellungen herangeht
- Schwierigkeit den Expansionsprozess zielgerichtet zu kontrollieren [? ]

Warum ist das Problem entstanden?

- Natürliche Strukturen folgen Regeln, Kodifizierbar machen von Strukturen

Wen betrifft das Problem?

- Ersteller von digitalen Inhalten, Schaffen künstlicher Intelligenz, Verstehen welche Regeln zu welchen Ergebnissen führt

Wie wichtig ist es, dass ich meine Forschung durchführe?

- Kodifizierbar machen von Strukturen der realen Welt → Künstliche Intelligenz, Wiederverwendbarkeit, Umsetzen gewisser Erwartungen eines Users an eine digitale Struktur
- Kompression von Strukturen → Speicherkomplexität in Laufzeitkomplexität umwandeln. Effiziente Balance schaffen
- Da prozedurale Modellierung eines der mächtigsten Mittel ist, um automatisch digitale Inhalte zu Erstellen und die digitale Welt immer wichtiger wird, ist die Forschung in diesem Bereich sehr wichtig
- 

Wie gut lassen sich Ansätze aus der aktuellen Forschung in einem Programm umsetzen?

- Man braucht verschiedenen Algorithmen mit verschiedenen Metriken, um eine Struktur „auslesen“ zu können, besser sind neuronale Netze → Quellen

Gibt es allgemeingültige Algorithmen?

- Eigene Algorithmen checken, Alternativen nachschauen, sind die verwendeten Algorithmen zu sehr auf mein Problem zugeschnitten?

Gibt es Widersprüche in aktueller Forschung?

- Nochmal einige Quellen lesen. Ich denke, es gibt keine direkten Widersprüche, aber viele verschiedene Ansätze → Quellen

Verbindung zum Titel der Bachelorarbeit schaffen.

- Zeigen, wie ich die Synthese anhand des Programms umsetzen will

### 1.2 Ziele

Gewichtungsparameter durchtesten, um zu schauen, wie sich das auf die Ergebnisse auswirkt.

Ergebnis des Systems mit validem Input mit Ergebnissen aus nicht validem Input vergleichen, um zu schauen, wie wichtig die Validität des Inputs ist.

### 1.3 Methodik

Abbildung 1 zeigt, wie das o.g. System aufgebaut ist:

- I. Strukturieren: Der Benutzer nutzt die grafische Benutzerschnittstelle, um aus einzelnen, atomaren Strukturen (**Templates**) eine zusammenhängende Struktur zu erstellen. Neben der Position der Templates können auch Parameter wie Rotation angepasst werden.
- II. Visualisieren: Das Ergebnis der Strukturierung ist jederzeit sichtbar. Einfache Liniensegmente können mit einem **Turtle-Algorithmus** gezeichnet werden.
- III. Datengenerierung: Das Ergebnis der Strukturierung wird in einer Baumstruktur organisiert, in der jeder Knoten einem bestimmten Template entspricht und die zugehörigen Kanten die geometrischen Transformationen relativ zum Elternknoten beschreibt.
- IV. Inferieren: Aus der Baumstruktur kann eine formale Grammatik in Form eines kleinen L-Systems abgeleitet werden, indem identische topologische Strukturen (Unterbäume) gefunden werden können.
- V. Optimieren: Hier werden ähnliche Produktionsregeln des L-Systems mithilfe einer **Kostenfunktion**<sup>1</sup> zusammengefasst (*engl. Merge*), um diese mit nicht-deterministischen Regeln und Rekursion zu generalisieren.
- VI. Randomisieren: Jedes Symbol der Grammatik nimmt eine Liste an Parametern entgegen, die in diesem Schritt nach bestimmten Kriterien pseudo-randomisiert werden, um Variationen zu erstellen und anschließend zu visualisieren.

---

<sup>1</sup>Die Kostenfunktion setzt sich sowohl aus der Länge der Grammatik, als auch der Distanz von der alten zur neuen, generalisierten Grammatik nach dem Merge zusammen

## 1.4 Aufbau

Im Folgenden wird auf die Methodik zum Ableiten eines L-Systems eingegangen und Konzepte und eigene Lösungsansätze präsentiert.

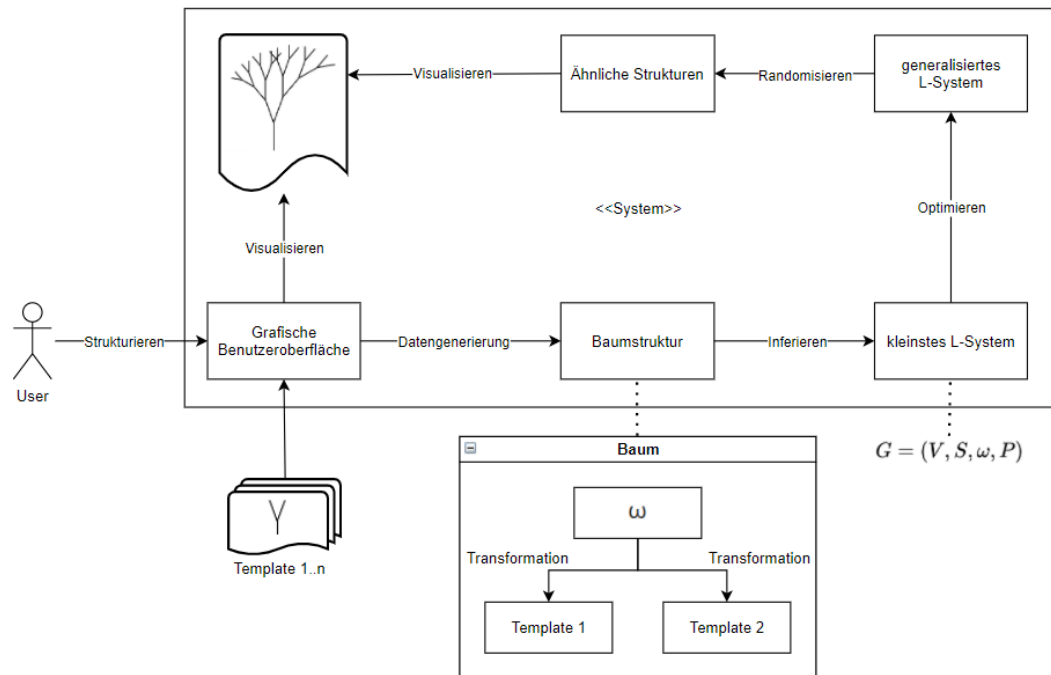


Abbildung 1.1: Architektur des Systems mit einigen Datenstrukturen

### System

Ziel des Systems ist die Erstellung von Ähnlichkeitsabbildern einer Struktur, die über eine grafische Benutzeroberfläche erstellt wird.

## 2 Grundlagen

Die Modellierung mithilfe von Grafiksoftware ist eine vergleichbar händische, langwierige Erstellung von Objekten. Hierbei hat der Designer (= Modellierer) die volle Kontrolle über die Strukturen des Objektes.

Bei der prozeduralen Modellierung werden spezifische Strukturen eines zu erstellenden physikalischen Objektes generalisiert und meist über eine Grammatik und globale Parameter abgebildet. Während bei der klassischen Modellierung die menschliche Intuition und bei der prozeduralen Modellierung eine parametrisierte Grammatik vorausgesetzt wird, arbeitet IPM mit bestehenden Modellen und extrahiert („lernt“) die Strukturen des Objektes, die automatisch in eine formale Grammatik überführt werden können. Die Generierung von prozeduralen Modellen ist ein wichtiges, offenes Problem.

Aktuelle Ansätze sind:

- Segmentierung von geometrischen Objekten in Ähnlichkeitsgruppen, um Muster (*engl. Patterns*) zu erkennen
- Kontrollierte Generierung durch Finden optimaler Parameter und Regeln

### 2.1 Grundbegriffe

- **Modellierung:** Um einen physikalischen Körper in ein digitales Objekt zu überführen, wird mithilfe von Abstraktion (oder Modellierung) ein mathematisches Modell erstellt, das diesen Körper formal beschreibt. 3D Grafiksoftware, wie Blender [? ], wird genutzt um geometrische Körper zu modellieren, texturieren und zu animieren.
- **Prozedurale Modellierung:** „*It encompasses a wide variety of generative techniques that can (semi-)automatically produce a specific type of content based on a set of input parameters.*“



„Prozedurale Modellierung beschreibt generative Techniken, die (semi-)automatisch spezifische, digitale Inhalte anhand von deskriptiven Parametern erzeugen“ (*Übersetzt durch den Autor*)

- **Inverse prozedurale Modellierung (IPM):** *Aliaga et al.* spricht bei der inversen prozeduralen Modellierung von dem Finden einer prozeduralen Repräsentation von Strukturen bestehender Modelle.

## 2.2 Grundlegende Arbeiten

Grundlagen

- prozedurale Modellierung [? ]
- inverse prozedurale Modellierung [? ]
- L-Systeme [? ]
- parametrisiert L-Systeme [? ]
- Logo-Turtle [? ]
- inverse Generierung von L-Systemem [? ]

„Not much work addresses inverse procedural modeling of branching structures“

Modellieren von

- Bäumen und Landschaften [? ]
- Fassaden [? ]
- Gebäuden [? ]
- Städten [? ]

### 2.2.1 Softwaretechnik

Eine Fallstudie der Universität Karlsruhe [?] untersucht den Einsatz der Softwaretechnik Extreme Programming(XP) im Kontext der Erstellung von Abschlussarbeiten im Universitätsumfeld. Hierzu werden folgende Schlüsselpraktiken untersucht:

- XP als Softwaretechnik zur schrittweisen Annäherung an die Anforderungen eines Systems
- Änderung der Anforderungen an das Systems
- Funktionalitäten (**Features**) werden als Tätigkeiten des Benutzers (**User Stories**) definiert
- Zuerst werden Komponententests (Modultests) geschrieben und anschließend die Features (Test-driven Design)
- Keine separaten Testing-Phasen
- Keine formalen Reviews oder Inspektionen
- Regelmäßige Integration von Änderungen
- Gemeinsame Implementierung (Pair Programming) in Zweiergruppen

Aus der Fallstudie geht hervor, dass Extreme Programming einige Vorteile bei der Bearbeitung eines Softwareprojektes einer Bachelorarbeit bietet. Zum einen können sich Anforderungen an das zu erstellende System durch parallele Literaturrecherche ändern, zum anderen können Arbeitspakete durch Releases abgebildet werden.

### L-Systeme

Lindenmayer [?] führt eine mathematische Beschreibung zum Wachstum fadenförmiger Organismen ein. Sie zeigt, wie sich der Status von Zellen infolge ein oder mehrerer Einflüsse verhält. L-Systeme sind Ersetzungssysteme, die zur formalen Beschreibung von Zellteilung eingeführt werden, und atomare Teile mithilfe von Produktionsregeln ersetzen. Weiter werden Symbole zur formalen Beschreibung von Verzweigungen, die von Filamenten abgehen, genutzt. Die bekanntesten L-Systeme sind zeichenketten-basiert und werden von *Noam Chomsky* eingeführt. Sie ersetzen parallel Buchstaben eines Wortes, die

von einer Grammatik über eine Sprache akzeptiert werden. L-Systeme können unter anderem parametrisiert oder nicht-parametrisiert und kontextfrei oder kontextsensitiv sein.

### Formalismen

Ein L-System ist ein Tupel und hat folgende Form:

$$\mathcal{L} = \langle M, \omega, R \rangle, \text{ mit}$$

- $M$  als Alphabet, das alle Symbole enthält, die in der Grammatik vorkommen können,
- $\omega$  als Axiom oder „Startwort“ und
- $R$  als Menge aller Produktionsregeln, die für  $\mathcal{L}$  gelten

Das Alphabet eines parametrischen Systems enthält Module (Symbole mit Parametern) anstatt Symbole:

$$M = \{A(P), B(P), \dots\} \text{ mit}$$

- $P = p_1, p_2 \dots$  als Modulparameter

Zeichen des Alphabets, die Ziel einer Produktionsregel sind, heißen Variablen. Alle anderen Zeichen aus  $M$  sind die Konstanten.

Das Axiom  $\omega$  ist eine nicht-leere Sequenz an Modulen aus  $M^+$  mit

- $M^+$  als Menge aller möglichen Zeichenketten aus Modulen aus  $M$

Produktionsregeln sind geordnete Paare aus Wörtern über dem Alphabet, die bestimmte Ersetzungsregeln umsetzen. Hierbei werden Symbole aus einem Wort, die einer rechten Seite (*engl. right hand side (RHS)*) einer Produktionsregel entsprechen, durch die linke Seite des Paares (*engl. left hand side (LHS)*) ersetzt. Sie sind folgendermaßen aufgebaut:

$$A(P) \rightarrow x, x \in M^*$$

$M^*$  ist die Menge aller möglichen Zeichenketten von  $M$  inklusive der leeren Zeichenkette  $\varepsilon$ . Ist die RHS jeder Produktionsregel ein einzelnes Symbol und gibt es zu jeder Variablen eine Regel, spricht man von einem kontextfreien, andernfalls von einem kontextsensitiven L-System.

### Logo-Turtle-Algorithmus

Der Logo-Turtle-Algorithmus [?] beschreibt ein Vorgehen zur graphischen Beschreibung von L-Systemen, bei dem jeder Buchstabe in einem Wort einer bestimmten Zeichenoperation zugewiesen wird. So kann aus einem L-System ein grafisches Muster generiert werden, das mit einer Abfolge von Zeichenbefehlen an eine „Schildkröte“ gezeichnet wird. Das Triplett  $(x, y, \theta)$  definiert den Status (**State**) der Schildkröte. Dieser setzt sich aus der aktuellen Position  $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$  und dem aktuellen Rotationswinkel  $\theta$ , der die Blickrichtung bestimmt, zusammen.

Der Algorithmus kann als Komprimierung eines geometrischen Musters gesehen werden. Folgende Symbole mit zugehörigen Steuerungsbefehlen und Statusveränderung sind definiert:

Symbol	Steuerung	Statusveränderung
$F(d)$	Gehe vom derzeitigen Punkt $p_1$ $d$ Einheiten in die Blickrichtung zu dem Punkt $p_2$ . Zeichne ein Liniensegment zwischen $p_1$ und $p_2$	ja, neue Position $p_2$
$+(\alpha)$	Setzt neuen Rotationswinkel $\theta = \theta + \alpha$	ja, neuer Rotationswinkel $\theta$
$-(\alpha)$	Setzt neuen Rotationswinkel $\theta = \theta - \alpha$	ja, neuer Rotationswinkel $\theta$
[	Lege den aktuellen State auf einen Stack	nein
]	Hole den State vom Stack und überschreibe den aktuellen mit diesem	nein

Alles zwischen den Symbolen [ und ] wird als Verzweigung interpretiert.

Bsp.  $FF[FF]F$  mit Verzweigung  $[FF]$

### 2.3 Verwandte Arbeiten

Bei *Inverse Procedural Modeling of Branching Structures by Inferring L-Systems*[?] geht es um ein Modell zum Lernen von L-Systemen von Verzweigungsstrukturen mithilfe maschinellen Lernens (*Deep Learning*) anhand beliebiger Grafiken. Hierzu werden atomare Strukturen mit einem neuronalen Netz erkannt, eine hierarchische Topologie (Baumstruktur) aufgebaut, aus der ein L-System inferiert und mit einem **Greedy** Algorithmus optimiert wird. Ausgabe des Systems ist ein generalisiertes L-System, aus dem ähnliche Strukturen, wie die der Inputgrafik, erstellt werden können.

Aus dieser Quelle werden folgende Konzepte genutzt:

- Nutzer einer Baumstruktur zur Organisation von genutzten atomaren Verzweigungsstrukturen (**Templates**) mit Knoten für Templates und Kanten für geometrische Transformationen
- Untersuchen der Baumstruktur auf Wiederholungen
- Parametrisierte L-Systeme (L-System mit **Modulen**) zur Abbildung von Transformationsparametern
- Kostenfunktion zur Bewertung eines L-Systems

Inverse prozedurale Modellierung anhand von Hausfassaden [? ], 2D-Anordnungen [? ? ], biologischen Bäumen [? ] und urbanen Strukturen [? ]

Polynomiale Algorithmen zum Inferrieren von L-Systemen [? ]

Framework zum Inferrieren von L-Systemen aus Vektordaten [? ]

Generalisieren einen Regelsets aus einem Inputset mit Markov Chain Monte Carlo [? ? ]

Lernen von Regeln zum Layout für Gebäude [? ]

Inverse prozedurale Modellierung von Fassaden [?] ]

## 3 Konzepte

...

### 3.1 Probleme & Lösungsansätze

...

### 3.2 Softwarearchitektur

Die Gliederung der Inhalte für die Softwarearchitektur erfolgt nach der arc42-Vorlage [1]

#### 3.2.1 Einführung und Ziele

Ziel ist die Erstellung eines Programms zur Synthetisierung von Ähnlichkeitsabbildungen einer vom Benutzer erstellten Verzweigungsstruktur mittels Inferieren und Optimieren von L-Systemen. Die wesentlichen Features des Programms sind:

- Erstellung einer Verzweigungsstruktur über eine grafische Benutzeroberfläche (**GUI**)
- Einbindung atomarer Strukturen über externe Dateien
- Synthetisierung von ähnlichen Verzweigungsstrukturen anhand der erstellten Struktur
- Anzeigen von Verzweigungsstrukturen

Priorisierte (absteigend) Qualitätsziele, die bei der Erstellung des Systems umgesetzt werden sollten:

- **Funktionalität** durch Umsetzung aller Teilsysteme



- **Interoperabilität** durch Nutzen einer allgemeinen Repräsentation von L-Systemen, damit diese auch in anderen Programmen oder Algorithmen verwendet werden kann
- **Erweiterbarkeit** durch offene Entwurfsmuster (Design Pattern)
- **Modulare** Implementierung für effiziente Wartung und Erweiterung
- **Effizienz** durch effiziente Programmierung
- **Attraktivität** durch intuitive Benutzung (Benutzerfreundlichkeit)
- **Plattformunabhängigkeit** durch Verwenden des Java-Frameworks

#### 3.2.2 Kontextabgrenzung

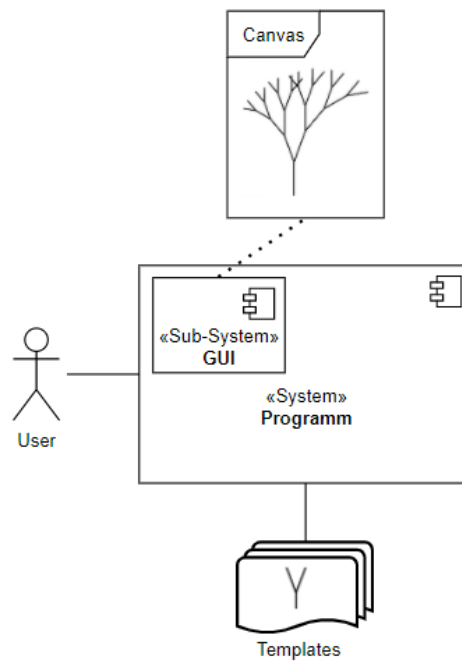


Abbildung 3.1: System und Systemumgebung

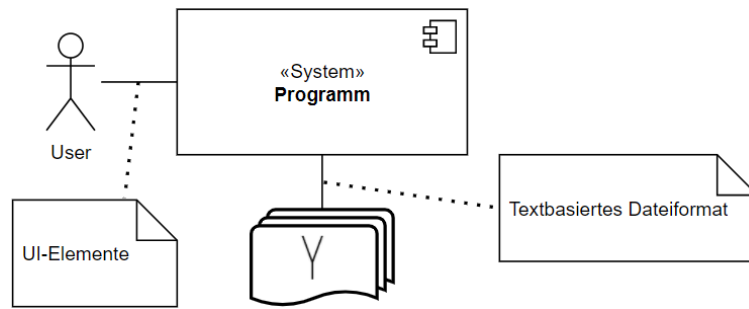


Abbildung 3.2: Technische Interaktion zwischen System und Systemumgebung

#### 3.2.3 Lösungsstrategie

Gewählte Architekturansätze zur Erreichung der Qualitätsziele:

Qualitätsziel	Architekturansatz
Funktionalität	<ul style="list-style-type: none"><li>• Grafische Benutzerschnittstelle: <i>GUI</i></li><li>• Generieren der Baumstruktur: <i>TreeGenerator</i></li><li>• Ableiten von L-Systemen aus Baumstrukturen: <i>Inferer</i></li><li>• Generalisieren von L-Systemen: <i>Generalizer</i></li><li>• Randomisieren von L-System Parametern: <i>Randomizer</i></li></ul>
Interoperabilität	Durch das Nutzen allgemeingültiger mathematischer Beschreibungen sollen erstellte L-Systeme in Fremdsystemen, wie Online Visualisierer, genutzt werden können
Erweiterbarkeit	Das Nutzen des <b>Pipeline Design Patterns</b> soll das Erweitern des Systems durch Hinzufügen weiterer Teilschritte ( <b>Pipes</b> ) erleichtern. Trennung der grafischen Oberfläche und der Logik durch Aufbauen des Szenengraphen über ein XML-Dateiformat
Modularität	Sowohl eine sinnvolle Aufteilung von Funktionalitäten auf Dateien und Pakete ( <b>Packages</b> ), als auch effiziente Datenkapselung und geschlossene Informationskontexte sorgen für Modularität des Programms

#### 3.2.4 Bausteinsicht

Ebene 1

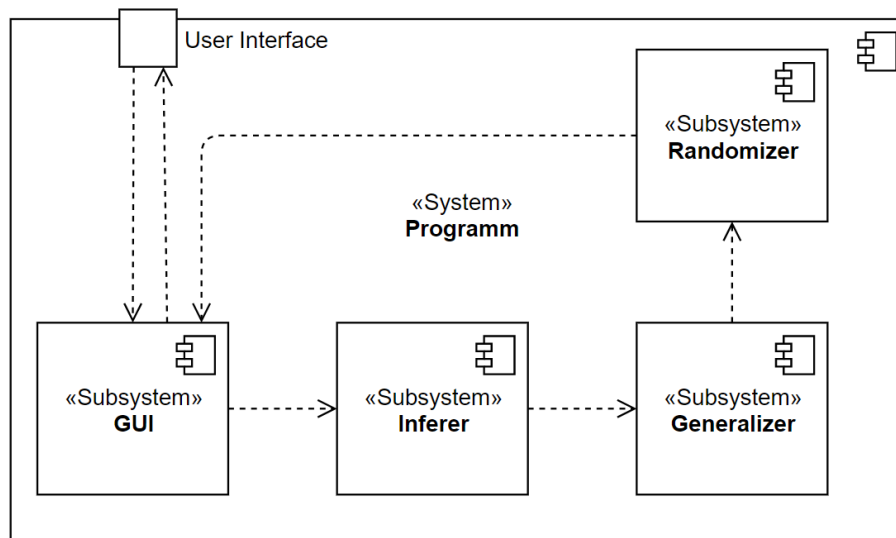


Abbildung 3.3: Subsysteme mit fachlichen Abhängigkeiten

## Ebene 2

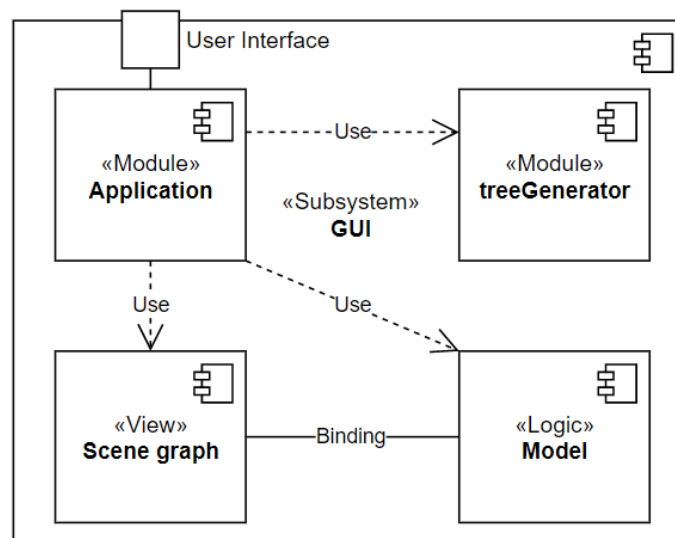


Abbildung 3.4: Subsystem GUI

### 3.2.5 Laufzeitsicht

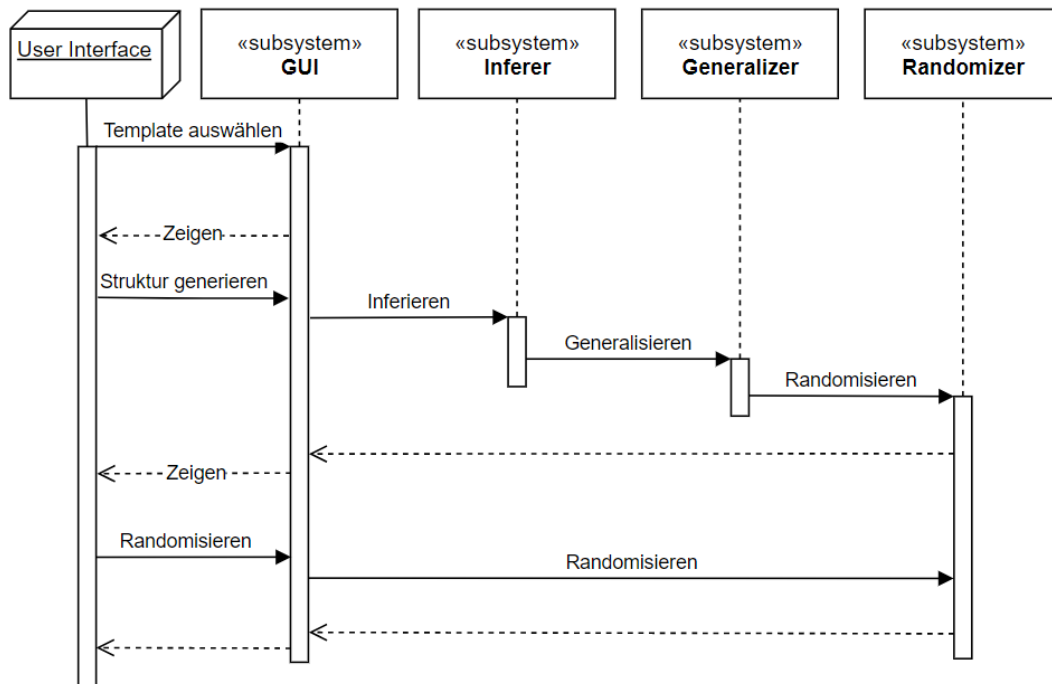


Abbildung 3.5: Laufzeitsicht

### 3.2.6 Verteilungssicht

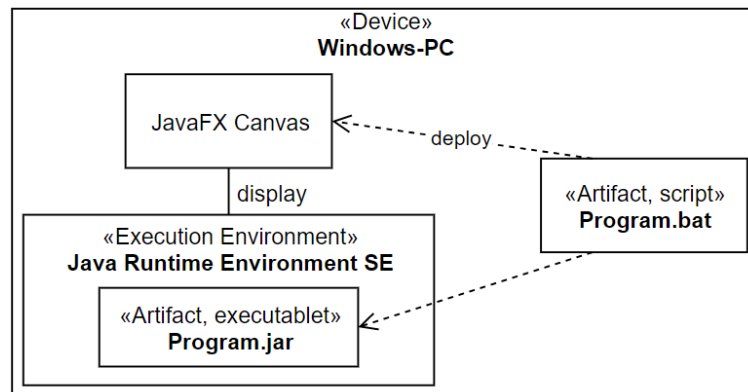


Abbildung 3.6: Infrastruktur Windows-PC

#### 3.2.7 Konzepte

##### Testbarkeit

Um eine ausreichende Testabdeckung zu erreichen, werden Klassen als kleinstmögliche zu testende Einheit definiert und durch Komponententests geprüft. Der Name eines Tests setzt sich aus dem Präfix als Name der zu testenden Klasse oder Releases und dem Suffix „Test“ zusammen. Testsubjekte werden als **Blackbox** behandelt, also anhand der Spezifikation getestet.

Bsp.: Klasse *Inferer* mit Komponententest *InfererTest*

Da jedes Release der Implementierung ein funktionsfähiges System beinhaltet, kann auf Integrationstests verzichtet werden. Weiter wird ein Release anhand von funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen getestet. Anhand dieser Systemtests wird geprüft, ob Gesamtspezifikationen umgesetzt worden sind.

Bsp.: Release 2 mit Systemtest *Release2Test*

Zum Schluss der Implementierung wird ein Akzeptanztest durchgeführt.

##### Validierung

Der Benutzer des Systems nutzt eine grafische Schnittstelle. Somit kann sichergestellt werden, dass dieser keine ungültigen Eingaben tätigt. Werden Template-Dateien unter einem bestimmten Dateipfad nicht gefunden, wird eine *NotFound*-Exception protokolliert und dem Benutzer eine Nachricht über ein Pop-up mitgeteilt. Eine *IllegalArgumentException* wird verzeichnet und ausgegeben, wenn eingelesene Template-Dateien strukturelle Fehler aufweisen.

#### Fehlerbehandlung

Zur Fehlersuche und -behandlung biete sich eine Protokollierung über Vorgänge, Fehler und Ausnahmen an. Bestimmte Fehler werden dem Benutzer weitergegeben und grafisch angezeigt. Folgende Subsysteme werden in das Programm integriert:

- Ausnahmebehandlung (Exception Handling) und
- Protokollierung (Logging)

Erwartete Exceptions werden jeweils mit eigenen Klassen abgebildet, die von einer entsprechenden Klasse aus der Exception-Hierarchie abgeleitet sind. Das Logging ist statisch und überall im System zugreifbar, um eine einheitliche Protokollierung zu gewährleisten.

#### Datenstrukturen

TODO: Klassendiagramm aus IntelliJ generieren

#### Workflows & Algorithmen

Um als Benutzer des Systems eine Verzweigungsstruktur zu erstellen, wird folgender Arbeitsablauf umgesetzt:

---

##### Algorithmus 31: Erstellen einer Verzweigungsstruktur

---

1	Erster Anker ist vorselektiert
2	Wiederhole, bis Struktur fertiggestellt ist:
3	Selektiere ein Template aus der Liste
4	Setzt Parameter
5	Bestätige Auswahl und Parameter
6	Zeichne ausgewähltes Template mit Parameternd
7	Wähle nächsten Anker aus

---

---

Aus der Verzweigungsstruktur kann nun ein L-System erzeugt werden:

Für  $\mathcal{L} = \langle M, \omega, R \rangle$ :

#### Algorithmus 32: Inferieren eines L-Systems aus einer Baumstruktur

---

```

1      Initialisierung :
2       $M = \{F, S\}$ 
3       $\omega = S$ 
4       $R \leftarrow \{\alpha: S \rightarrow A\}$ 
5       $\beta = \text{nächster Knoten*}$ 
6       $M \leftarrow \gamma \in \{A, B, \dots, Z\}, \text{ mit } \gamma \notin M$ 
7
8      Schleife :
9       $\delta = \text{Wort von } \beta$ 
10      $\forall \{X, Y, Z\} \in \delta :$ 
11     Ersetze mit  $\zeta \in \{A, B, \dots, Z\}, \text{ mit } \zeta \notin M$ 
12      $M \leftarrow \zeta$ 
13      $R \leftarrow \{\gamma \rightarrow \delta\}$ 
14     Wenn es ein Symbol  $\eta$  in  $M \setminus \{F, S\}$  gibt mit  $\{\eta \rightarrow bel.\} \notin R :$ 
15      $\gamma = \eta$ 
16     Sonst :
17     Breche Schleife ab
18      $\beta = \text{nächster Knoten*}$ 

```

---

\* nach Breitensuche, beginnend bei Wurzelknoten S



Um ein kompakteres, gewichtetes L-System zu erzeugen, werden sich wiederholende Unterräume gesucht und ersetzt. Die Gewichtung wird angewendet, um das erzeugte L-System in ein System mit kleiner Regelmenge ( $w_l = 1$ ) oder mit großer Regelmenge ( $w_l = 0$ ) umzuwandeln:

---

Algorithmus 33: Erstellen eines kompakten L-Systems mit Gewichtung  $w_l$

---

```

1  Initialisierung :
2   $\mathcal{L}^+ \leftarrow L_s^*$ 
3   $\mathcal{L} = \emptyset$ 
4  Setze Gewichtungsparameter  $w_l \in [0, 1]$ 
5  Finde maximalen Unterbaum  $T'$  aus  $T^{**}$  mit Wiederholungen  $n$ 
6
7  Reduzierung :
8  if  $n > 1$ 
9  Ersetze alle Vorkommen von  $T'$  mit dem selben Symbol  $\gamma \in \{A, B, \dots, Z\}$ 
10  $R \leftarrow \{\gamma \rightarrow L_s\}$  mit  $L_s$  aus  $T'$ ,  $R$  aus  $\mathcal{L}$ 
11 if  $C_i(\mathcal{L}) \geq C_i(\mathcal{L}^+)$ 
12 break
13  $T \leftarrow T'$ 
14  $\mathcal{L}^+ \leftarrow \mathcal{L}$ 
15 Finde maximalen Unterbaum  $T'$  aus  $T$  mit Wiederholungen  $n$ 

```

---

\*  $L_s$  als Zeichenkette des ausgeführten L-Systems  $\mathcal{L} = \langle M, \omega, R \rangle$  \*\*  $T$  als Baumstruktur des L-Systems

Die Kostenfunktion stellt die Anzahl Symbole aller *RHS* der Produktionsregeln mit der Menge an Anwendungen der *LHS* gegenüber:

---

Algorithmus 34: Kostenfunktion  $C_i$  mit Gewichtung  $w_l$

---

```

1   $C_i(\mathcal{L}) = \sum_{A(P) \rightarrow M^* \in \mathcal{L}} w_l * |M^*| + (1 - w_l) * N(A(P) \rightarrow M^*)^{***}$ 

```

---

\*\*\*  $N(\cdot)$  als Zählfunktion für die Anzahl Wiederholungen einer *LHS* einer Regel in einem ausgeführten L-System

Da das kompakte L-System eine Repräsentation der vom Benutzer erzeugten Verzweigungsstruktur darstellt, werden nun ähnliche Regeln miteinander verbunden und mit einer Wahrscheinlichkeit versehen, um nicht-deterministische Regeln hinzuzufügen.

---

Algorithmus 35: Längenfunktion  $L$  für Grammatiken

---

```

1   $L(\mathcal{L}) = |M| + \sum_{A(P) \rightarrow M^* \in \mathcal{L}} |M^*|$ 

```

---

---

Algorithmus 36: Kostenfunktion  $C_g$  mit Gewichtung  $w_0$

---

1  $C_g(\mathcal{L}^*, \mathcal{L}^+) = w_0 * (L(\mathcal{L}^*) - L(\mathcal{L}^+)) + (1 - w_0) + D_g(\mathcal{L}^+, \mathcal{L}^*)$

---



---



---

Algorithmus 37: Generalisieren eines L-Systems mit Gewichtung  $w_0$

---

```

1  Initialisierung :
2  Regelpaar  $p^* = \emptyset$ 
3   $\mathcal{L}^* = \mathcal{L}^+$ 
4   $C_g^{old} = C_g(\mathcal{L}^* + \{p^*\}, \mathcal{L}^*)$ 
5
6  Schleife :
7  do
8  Finde Regelpaar  $p^*$  mit minimalen Kosten  $C_g(\mathcal{L}^* + \{p_i\}, \mathcal{L}^*), \forall p_i \in \mathcal{P}^*$ 
9  if  $C_g(\mathcal{L}^* + \{p^*\}, \mathcal{L}^*) \geq 0$ 
10 break
11  $c^* = C_g(\mathcal{L}^* + \{p^*\}, \mathcal{L}^*) - C_g^{old}$ 
12  $C_g^{old} = C_g(\mathcal{L}^* + \{p^*\}, \mathcal{L}^*)$ 
13  $\mathcal{L}^* = \mathcal{L}^* + \{p^*\}$ 
14 while  $c^* \leq 0$ 

```

---



---

\*  $\mathcal{P}$  als Menge aller möglichen Regelpaaren aus  $\mathcal{L}^*$

## 4 Implementierung

### 4.1 Pakete?

Die Implementierung des Programms setzt sich aus folgenden Teilschritten zusammen:

- Erstellung der *GUI* (Paket `gui`, `tree`) mit
  - UI-Elementen
  - Render-Canvas
  - Dateianbindung der Templates
  - Erstellung der repräsentativen Baumstruktur (*treeGenerator*, Paket `tree`)
- Implementierung der Subsysteme als Pipes
  - *Inferer* (Paket `grammar`): Ableiten eines kompakten L-Systems aus einer Baumstruktur
  - *Generalizer* (Paket `grammar`): Generieren eines generalisierten L-Systems anhand eines „kleinen“ L-Systems
  - *Randomizer* (Paket `grammar`): Erzeugung von L-Systemen, die der erstellen Verzweigungsstruktur „ähnlich“ sind
- Komponenten- und Systemtests

Subsystem	Umsetzung
GUI	JavaFX als Framework zur Erstellung von grafischen und interaktiven Inhalten. Erstellung der Baumstruktur über dynamisches Erzeugen von Knoten während der Strukturierung der Verzweigungsstruktur
Inferer	Algorithmus zum Iterieren maximaler Sub-Bäume und deren Reduzierung mittels Ersetzung durch Symbole und der zugehörigen Produktionsregel, bis eine Kostengrenze, die durch eine Kostenfunktion abgebildet werden kann, erreicht ist
Generalizer	Algorithmus zum Erweitern eines L-Systems um nicht-deterministische Regeln und Erkennen rekursiver Strukturen
Randomizer	ddd sfevdhbnreaydtydbfsdxc

## 4.2 Entscheidungen

Mutable or Immutable Objects?

Risiken

Qualitätsmerkmale

Alternativen

Aufwand der Implementierung

## 4.3 Technologien

- Programmiersprache: Java Version 11 mit

- JavaFX Version 15 (openjfx)
- Build-Management-Tool: Gradle[4] Version 6.7
- Versionskontrolle: Github Repository[3] via Git[2]
- IDE: JetBrains IntelliJ IDEA[6] 2020.2.2 (Ultimate Edition)
- Betriebssystem: Microsoft Windows 10 Pro 64 Bit
- User Story Map: Trello Board[10]

### 4.4 Hardware

- Prozessor: Intel Core i5-3570K CPU @ 3.40GHz

## 5 Evaluierung

...

### 5.1 Testumgebung

...

### 5.2 Beobachtungen & Ergebnisse

...

### 5.3 Diskussion und Bewertung

...

## 6 Ausblick

...

# Literaturverzeichnis

- [1] HRUSCHKA, Dr. P. ; STARKE, Dr. G.: *arc42 Softwarearchitektur-Template*. <https://arc42.de/template/>. – Pragmatisches Muster für die Erstellung, Dokumentation und Kommunikation von Software- und Systemarchitekturen
- [2] *Git - the stupid content tracker*. <https://git-scm.com/>. – Git is a member of Software Freedom Conservancy
- [3] *Github*. <https://github.com/adrian-helberg/bachelor>. – GitHub, Inc. (2020)
- [4] *Gradle Build Tool*. <https://gradle.org/>. – Gradle Inc. 2020
- [5] GUO, Jianwei ; JIANG, Haiyong ; BENES, Bedrich ; DEUSSEN, Oliver ; ZHANG, Xiaopeng ; LISCHINSKI, Dani ; HUANG, Hui: Inverse Procedural Modeling of Branching Structures by Inferring L-Systems. In: *ACM Trans. Graph.* 39 (2020), Juni, Nr. 5. – URL <https://doi.org/10.1145/3394105>. – ISSN 0730-0301
- [6] *Jetbrains IntelliJ IDEA*. <https://www.jetbrains.com/idea/>. – Capable and Ergonomic IDE for JVM
- [7] LINDENMAYER, A: Mathematical models for cellular interactions in development. I. Filaments with one-sided inputs. In: *Journal of theoretical biology* 18 (1968), March, Nr. 3, S. 280—299. – URL [https://doi.org/10.1016/0022-5193\(68\)90079-9](https://doi.org/10.1016/0022-5193(68)90079-9). – ISSN 0022-5193
- [8] MULLER, M. M. ; TICHY, W. F.: Case study: extreme programming in a university environment. In: *Proceedings of the 23rd International Conference on Software Engineering. ICSE 2001*, 2001, S. 537–544
- [9] PRUSINKIEWICZ, P: Graphical Applications of L-Systems. In: *Proceedings on Graphics Interface '86/Vision Interface '86*. CAN : Canadian Information Processing Society, 1986, S. 247–253



- [10] *Trello Board*. <https://trello.com/>. – Trello Board, 2020 Atlassian

## A Anhang

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.

# Glossar

**HAW Hamburg** Die HAW Hamburg ist die formalige Fachhochschule am Berliner Tor.

## Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „— bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] — ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

*Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI*

## Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: \_\_\_\_\_

Vorname: \_\_\_\_\_

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit – bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

### **Template-basierte Synthese von Verzweigungsstrukturen mittels L-Systemen**

ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

_____	_____	_____
Ort	Datum	Unterschrift im Original