

BACHELOR THESIS
Benjamin Schröder

Beispiel-basierte inverse prozedurale Generierung für zweidimensionale Szenen

FAKULTÄT TECHNIK UND INFORMATIK
Department Informatik

Faculty of Engineering and Computer Science
Department Computer Science

Benjamin Schröder

Beispiel-basierte inverse prozedurale Generierung für zweidimensionale Szenen

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: Prof. Dr. Peer Stelldinger

Eingereicht am: 11. Juli 2024

Benjamin Schröder

Thema der Arbeit

Beispiel-basierte inverse prozedurale Generierung für zweidimensionale Szenen

Stichworte

TODO SCHLÜSSELWÖRTER

Kurzzusammenfassung

TODO ZUSAMMENFASSUNG

Benjamin Schröder

Title of Thesis

Example-based inverse procedural generation for two-dimensional scenes

Keywords

TODO KEYWORDS

Abstract

TODO ABSTRACT

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	vi
Tabellenverzeichnis	vii
Abkürzungen	viii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Problemstellung	2
1.3 Ziele und Vorgehen	2
2 Grundlagen	3
2.1 Prozedurale Generierung	3
2.2 Geschichte von PCG	4
3 Theorie	5
3.1 Überblick	5
3.2 Grundlagen	7
3.2.1 Input	7
3.2.2 Der Winkelgraph	7
3.2.3 Lokale Ähnlichkeit	8
3.2.4 Planarität und der Graph Boundary String	9
3.2.5 Grundlegende Operationen	9
3.3 Ablauf	9
3.3.1 Anpassen des Inputs	9
3.3.2 Finden der Primitive	10
3.3.3 Aufbauen der Hierarchie	10
4 Implementation	11

5	Auswertung	12
6	Fazit	13
	Literaturverzeichnis	14
A	Anhang	16
A.1	Verwendete Hilfsmittel	16
	Selbstständigkeitserklärung	17

Abbildungsverzeichnis

3.1	Überblick zum Ablauf des Verfahrens	6
3.2	reference grid	8
3.3	Beispiel für r-Ähnlichkeit	9

Tabellenverzeichnis

A.1	Verwendete Hilfsmittel und Werkzeuge	16
-----	--	----

Abkürzungen

PCG Prozedurale Content Generierung.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Erstellung von fiktiven Welten spielt eine große Rolle in vielen Videospielen, Filmen, Virtual Reality Umgebungen und weiteren Bereichen der Simulation. Hierfür wird eine Vielzahl an verschiedenen Objekten und Strukturen benötigt, um ein nicht-repetitives und immersives Erlebnis für den Endnutzer zu schaffen. All dies manuell anzufertigen, stellt vor allem kleinere Indie-Entwicklerstudios vor eine große Herausforderung und kann die Entwicklungszeit signifikant in die Länge ziehen. Selbst in größeren Teams mit einer Vielzahl von Designern, nimmt die Erstellung von realistischen Welten einige Monate in Anspruch. [3] Hier kann an vielen Stellen nachgeholfen werden, indem man das Erstellen von Inhalten automatisiert. Entsprechende Prozesse lassen sich dem Bereich der prozeduralen Generierung zuordnen.

Mithilfe von verschiedensten Verfahren können so z.B. einzelne Dungeons oder sogar ganze Welten und darin enthaltene Gebilde automatisch erzeugt werden. Diese bilden eine Grundstruktur für ein komplexeres Design, bei dem die Entwickler dann nur noch kleinere Details per Hand abändern oder hinzufügen müssen.

Andererseits existieren auch viele Videospiele, wie z.B. Minecraft¹ oder Terraria², die auf prozeduraler Generierung aufbauen, um ihr Spielkonzept umzusetzen. Konkret wird einem neuen Spieler hier eine komplett neue und einzigartige, aber dennoch logisch zusammenhängende Welt generiert. Somit macht jeder Spieler eine andere Erfahrung und kann das Spiel außerdem gewissermaßen unbegrenzt oft durchspielen, ohne dass es repetitiv wirkt. So etwas wäre ohne Automatisierung gar nicht erst umsetzbar.

¹<https://www.minecraft.net/>

²<https://terraria.org/>

1.2 Problemstellung

Es gibt viele bekannte Verfahren, welche solche Ergebnisse unter der Verwendung von u.a. zellulären Automaten, generativen Grammatiken oder Constraint-basierten Graphen erzielen können. [4] Größtenteils beruhen diese jedoch auf der Anwendung von manuell erstellten Regeln, so z.B. eine Menge an gegebenen Produktionsregeln bei der Nutzung von Grammatiken. Das Erstellen solcher Regeln ist mit viel Arbeit und Trial-and-Error verbunden und kann ohne ein ausgeprägtes Verständnis des angewandten Verfahrens sehr schwierig werden. Dadurch kommt es für viele Designer letztendlich doch nicht in Frage. Hier setzt diese Arbeit an und untersucht die automatische Erstellung solcher Regeln.

1.3 Ziele und Vorgehen

Spezifisch soll versucht werden, Muster in Beispielstrukturen zu erkennen. Aus diesen Mustern sollen dann Regeln zum Zusammensetzen von Strukturen mit ähnlichen Eigenschaften abgeleitet werden.

Hier gibt es bereits verschiedene Verfahren, die einen solchen Ansatz verfolgen. Diese sind u.a. der Gitter-basierte Wave Function Collapse Algorithmus von Maxim Gumin³, die nach Symmetrien suchende inverse prozedurale Modellierung von Bokeloh et al. [1], oder das Polygon-basierte Verfahren von Paul Merrell. [5]

Diese Verfahren werden analysiert und anschließend das vielversprechendste davon praktisch umgesetzt. Das Endergebnis der Arbeit soll dann sein, dass das ausgewählte Konzept ausführlich und verständlich erläutert, und nach eigener Interpretation konkret implementiert wird. Im Rahmen dieser Arbeit soll dies lediglich für den zweidimensionalen Raum geschehen, könnte jedoch im Anschluss auch auf die dritte Dimension ausgeweitet werden.

Ebenfalls soll eine grafische Benutzeroberfläche bereitgestellt werden, über welche der Endnutzer Inputstrukturen auswählen, sowie Parameter zur Beeinflussung des Algorithmus anpassen kann.

³<https://github.com/mxgmn/WaveFunctionCollapse/>

2 Grundlagen

Als Grundlage für das Verständnis des weiteren Inhalts dieser Arbeit machen wir zunächst einen kurzen Abstecher in den Bereich der prozeduralen Generierung allgemein. Wir stellen klar, was unter diesem Begriff zu verstehen ist und widmen uns außerdem kurz der zugrundeliegenden Geschichte. Dabei werden wir einige fundamentale Errungenschaften und Verfahren betrachten, die den Weg zum aktuellen Forschungsstand geprägt haben.

2.1 Prozedurale Generierung

Prozedurale Generierung, oder auch Prozedurale Content Generierung (PCG), beschreibt eine Menge von Verfahren zum algorithmischen Erstellen von Inhalten (“Content”). Dabei handelt es sich meist um Inhalte in Form von Texturen oder verschiedenen Gebilden im Kontext von Videospielen und anderen Simulationen, wie z.B. Landschaften, Flüsse, Straßennetze, Städte oder Höhlenstrukturen. [2] Auch Musik kann durch solche Verfahren generiert werden. [6]

Diese Definition ist absichtlich etwas allgemeiner gehalten, da das Aufstellen einer spezifischeren Definition nicht besonders trivial ist. Das Konzept von PCG wurde bereits aus vielen verschiedenen Blickwinkeln beleuchtet und ist für verschiedene Personen von unterschiedlicher Bedeutung. So hat z.B. ein Game Designer eine etwas andere Perspektive als ein Wissenschaftler, der sich lediglich in der Theorie mit der Thematik beschäftigt. [9] Verschiedene Definitionen unterscheiden sich in Bezug auf Zufälligkeit, die Bedeutung von “Content”, oder darin, ob und in welchem Umfang menschliche Intervenierung eine Rolle in einem Verfahren spielen darf. Smelik et al. definieren “Content” als jegliche Art von automatisch generierten Inhalten, welche irgendwie anhand von einer begrenzten Menge an Nutzer-definierten Parametern erzeugt werden können. [8] Timothy Roden und Ian Parberry beschreiben entsprechende Verfahren zur Erzeugung dieser Inhalte als *Vermehrungsalgorithmen* (“amplification algorithms”), da diese eine kleinere Menge

von Inputparametern entgegennehmen und diese in eine größere Menge an Outputdaten transformieren. [7] Togelius et al. [9] versuchen den Bereich genauer abzugrenzen, indem sie anhand von Gegenbeispielen aufzeigen, was *nicht* als PCG bezeichnet werden sollte. So zählt für Togelius et al. z.B. das Erstellen von Inhalten eines Videospiele mittels Level-Editor in keinem Fall als PCG, auch wenn dabei das Spiel indirekt durch z.B. automatisches Hinzufügen oder Anpassen von Strukturen beeinflusst wird. Generell wird sich in der Arbeit von Togelius et al. [9] ausführlich mit dem Problem der Definition von PCG befasst, weshalb dies hier nun nicht weiter thematisiert werden soll. Die oben genannte grobe Erklärung fasst die Kernaussage der verschiedenen Definitionen weitestgehend zusammen und sollte für unsere Zwecke ausreichen.

2.2 Geschichte von PCG

3 Theorie

Im Folgenden werden die theoretischen Konzepte hinter dem praktischen Teil der Arbeit betrachtet. Das implementierte Verfahren wird Schritt für Schritt vorgestellt und im Detail erläutert. Die vorgestellten Konzepte beruhen auf den Erkenntnissen von Paul Merrell in seiner Arbeit aus dem Jahr 2023 [5].

3.1 Überblick

Bevor es um die Einzelheiten und spezifischen Konzepte geht, wird zunächst ein grober Überblick zum Ablauf des umgesetzten Verfahrens geliefert. Das Ganze beginnt mit einer polygonalen Inputstruktur, d.h. einem Gebilde bestehend aus einem oder mehreren Polygonen (siehe Abbildung 3.1-I). Diese Inputstruktur wird anschließend umgewandelt in einen Graphen, in welchem die konkrete Geometrie des Inputs keine Rolle mehr spielt und sich auf die für das Verfahren wichtigen Eigenschaften des Inputs konzentriert werden kann.

Im nächsten Schritt wird der erstellte Graph nun in seine kleinstmöglichen Einzelteile zerlegt. Dazu werden alle Kanten in zwei Halbkanten aufgeteilt. Das Ergebnis sind viele Teilgraphen, welche jeweils nur noch aus einem Knoten und einigen Halbkanten bestehen. Einen solchen Teilgraphen nennen wir *Primitiv*. Diese Primitive werden dann Schritt für Schritt in allen möglichen Kombinationen zusammengeklebt, was zum Entstehen einer Hierarchie an immer komplexer werdenden Graphen führt (siehe Abbildungen 3.1-II und 3.1-III).

Beim Aufbau der Hierarchie werden die neu entstehenden Graphen auf bestimmte Eigenschaften überprüft, die es uns erlauben, daraus Regeln für ein Graphersetzungssystem abzuleiten (siehe Abbildung 3.1-IV). Das einfachste Beispiel hierfür sind vollständige Graphen, also Graphen, die nur noch aus in sich geschlossenen Kreisen bestehen und

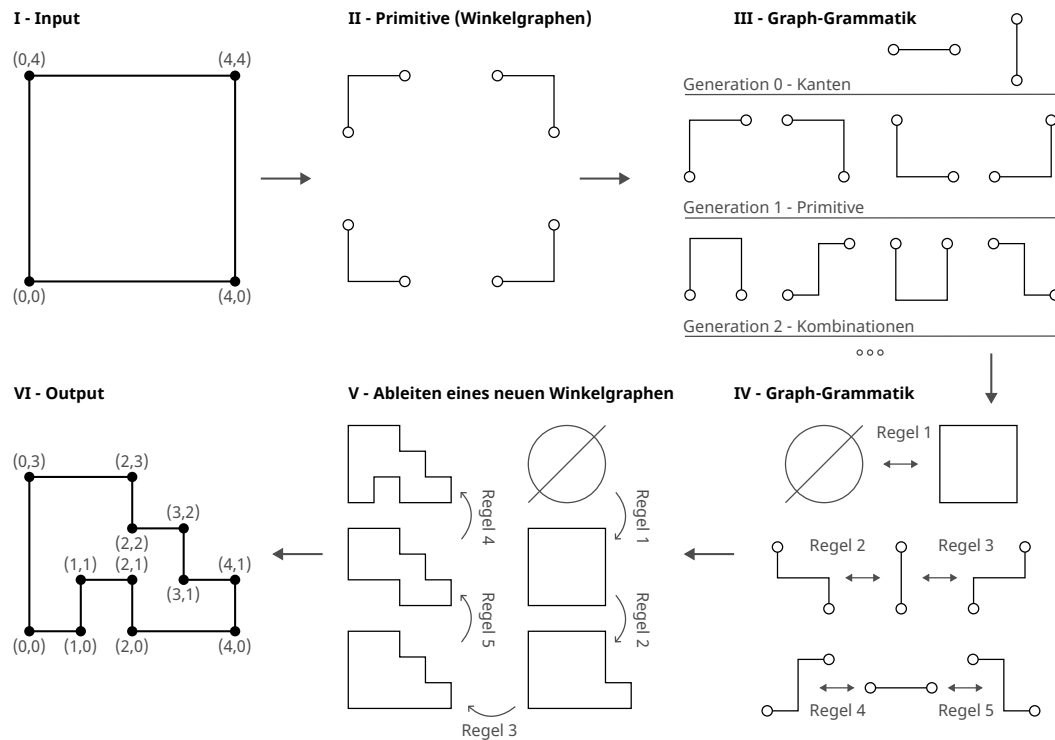


Abbildung 3.1: Überblick zum Ablauf des Verfahrens

keine Halbkanten mehr besitzen. Aus diesen lässt sich eine sogenannte Startregel ableiten, welche den leeren Graphen mit dem gefundenen vollständigen Graphen ersetzt. Das Finden von weiteren Regeln ist deutlich komplizierter und wird später im Detail erläutert.

Sobald man nun eine Menge von Regeln für das Graphersetzungssystem gefunden hat, kann man diese verwenden um verschiedenste zum Inputgraphen ähnliche Graphen abzuleiten, indem zufällig verschiedene Regeln nach und nach angewendet werden (siehe Abbildung 3.1-V). Für einen solchen Graphen müssen dann noch konkrete Knotenpositionen und Kantenlängen bestimmt werden, sodass dieser wieder als Struktur aus Polygonen dargestellt werden kann (siehe Abbildung 3.1-VI).

3.2 Grundlagen

3.2.1 Input

Der Algorithmus kann mit beliebigen polygonalen Strukturen als Input arbeiten. Dies können einfache Rechtecke oder aber auch komplizierte Gebilde aus verschiedenen Häusern oder ähnlichem sein. Wichtig ist lediglich, dass der Input als Sammlung von Polygonen beschrieben werden kann, welche wiederum als Sammlung von Punkten und Kanten beschrieben werden können. So sind z.B. Kreise oder andere Strukturen mit Rundungen kein valider Input und können wenn dann nur durch komplexe Polygone angenähert werden. Die einzelnen Polygone können außerdem mit Farben versehen werden, um verschiedene Arten von abgegrenzte Bereichen im Input zu markieren.

3.2.2 Der Winkelgraph

Zur Verarbeitung des Inputs wird dieser in einen sogenannten Winkelgraphen umgewandelt, in welchem die spezifischen Positionen der Knoten keine Rolle spielen. Stattdessen wird nur abgebildet, welche Knoten es überhaupt gibt, welche der Knoten durch Kanten miteinander verbunden sind, und in welchem Winkel diese Kanten verlaufen. Die Kanten im Graphen werden mit einem entsprechenden Label versehen, welches neben den Start- und Endknoten ebenfalls Informationen zum daraus ableitbaren Tangentenwinkel, sowie zu den Farben der links und rechts anliegenden Polygone enthält. Ein Kantenlabel besitzt die Form $\tilde{k} = (l, r, \theta)$, wobei \tilde{k} die Bezeichnung der Kante, l und r die Farben der anliegenden Polygone, und θ der Tangentenwinkel der Kante sind. Nach der Umwandlung des Inputs in einen Winkelgraphen ist dieser zunächst *vollständig*, d.h. er besteht ausschließlich aus geschlossenen Kreisen. In späteren Verarbeitungsschritten wird dieser allerdings in unvollständige Teilgraphen zerlegt, welche dann außerdem *Halbkanten* enthalten können. Im Gegensatz zu den vorher erwähnten Kanten sind diese gerichtet, können aber trotzdem durch ein gleichartiges Kantenlabel beschrieben werden. In späteren Abschnitten wird noch etwas genauer auf die Relevanz von Halbkanten und deren spezifische Notation eingegangen.



Abbildung 3.2: reference grid

3.2.3 Lokale Ähnlichkeit

Ziel des Algorithmus ist es, Variationen des Inputs zu erzeugen. Dabei soll der Output eine gewisse Ähnlichkeit zum Input beibehalten. Global vorzugehen und die vollständigen Input- und Output-Strukturen miteinander zu vergleichen führt hierbei allerdings zu keinem vernünftigen Ergebnis. Der Output muss sich zumindest teilweise vom Input unterscheiden, ansonsten ist das Ergebnis nicht zu gebrauchen. Um Vergleiche auf einer kleineren Ebene vornehmen zu können, stellen wir hier das Konzept der *lokalen Ähnlichkeit* vor.

Zwei Polygonstrukturen sind sich lokal ähnlich, wenn sich jeder Teil der einen Struktur zu einem Teil der anderen Struktur zuordnen lässt. Es müssen sich also alle Kanten und Polygonfarben mit gleicher Anordnung irgendwo in beiden Strukturen finden lassen. Befindet sich im Input z.B. ein Eckpunkt, welcher mit einer vertikalen und einer horizontalen Kante verbunden ist, so muss der Output ebenfalls einen Eckpunkt enthalten, der an einer vertikalen und einer horizontalen Kante anliegt.

Ein verwandtes Konzept, das zum Verständnis beitragen kann, ist das der *r-Ähnlichkeit* [1]. Zwei Strukturen sind hier *r*-ähnlich, wenn wir für jeden Punkt innerhalb der einen Struktur einen Kreis mit Radius *r* aufspannen können und sich der Inhalt dieses Kreises (*r*-Nachbarschaft des Punktes) genauso in der anderen Struktur wiederfinden lässt.

Die hier verwendete lokale Ähnlichkeit funktioniert nach dem gleichen Konzept, mit der Ausnahme, dass der Radius so klein wie möglich gehalten wird. Wir schauen uns also lediglich an, welche Kanten und Polygone direkt an einem Punkt anliegen, während uns die restliche Nachbarschaft egal ist. So können die betrachteten Strukturen beliebig skaliert werden und trotzdem ihre lokale Ähnlichkeit zueinander bewahren, solange alle Kantenwinkel dabei beibehalten werden.

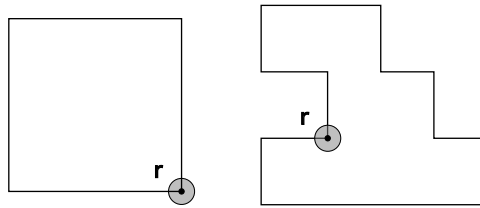


Abbildung 3.3: Beispiel für r-Ähnlichkeit

3.2.4 Planarität und der Graph Boundary String

3.2.5 Grundlegende Operationen

Teil-Operation. Eine Kante \tilde{k} kann in zwei Halbkanten k und \bar{k} zerteilt werden. Im Gegensatz zu \tilde{k} sind diese beiden Halbkanten gerichtet und zeigen in entgegengesetzte Richtungen. Dabei zeigt k stets in positive Richtung und besitzt einen positiven Tangentenwinkel $\theta \in [0^\circ, 180^\circ)$, während \bar{k} immer in negative Richtung zeigt und einen negativen Tangentenwinkel $\theta \in [-180^\circ, 0^\circ)$ besitzt. Ein Tangentenwinkel von 0° zählt hier als positiv. Der entgegengesetzte Winkel von 180° gilt als negativ, da dieser ebenfalls als -180° interpretiert werden kann. Die Teil-Operation ermöglicht das Zerlegen vom Input in die jeweiligen Primitive.

Klebe-Operation. Zwei entgegengesetzte Halbkanten k und \bar{k} können wieder zu einer vollständigen und ungerichteten Kante \tilde{k} zusammengeklebt werden. Dies ermöglicht die Kombination von mehreren kleineren Graphen, vorausgesetzt diese besitzen passende Halbkanten. Die Klebe-Operation stellt somit das Gegenteil zur Teil-Operation dar und wird dazu genutzt, Schritt für Schritt die Graph-Hierarchie aufzubauen.

3.3 Ablauf

3.3.1 Anpassen des Inputs

Bevor wir mit dem Verfahren beginnen können, muss der Input an bestimmte Anforderungen angepasst werden. Die übergebene Polygonstruktur kann so nicht direkt verarbeitet werden und muss erst einmal in einen Winkelgraphen umgewandelt werden. Dazu

werden zunächst einfach alle Knoten und Kanten aus dem Input übernommen. Anschließend werden die Knotenpositionen genutzt, um den Verlauf der Kanten in Form eines Tangentenwinkels zu ermitteln. Sobald dies geschehen ist, können die Knotenpositionen dann ignoriert werden, da lediglich die Ausrichtung der Kanten eine Rolle für die weiteren Schritte spielt. Die restlichen Informationen zur Geometrie werden nicht benötigt und erst beim Erzeugen des finalen Outputs wieder festgelegt.

3.3.2 Finden der Primitive

Ist nun der Winkelgraph ermittelt worden, können wir daraus die Primitive ableiten. Diese sind die fundamentalen Grundbausteine für das gesamte Verfahren. Aus ihnen werden alle weiteren Strukturen abgeleitet, weshalb es besonders wichtig ist, diese korrekt und vollständig zu ermitteln. Glücklicherweise wird dies durch die vorgestellte Teil-Operation recht trivial. Wenden wir diese auf jede Kante des gegebenen Winkelgraphen an, so bleiben nur Teilgraphen übrig, welche nur aus einem einzelnen Knoten, sowie einigen Halbkanten bestehen. Diese Teilgraphen sind dann auch schon die gesuchten Primitive. Hier können allerdings einige identische Teilgraphen entstehen, falls Teile des Input eine ähnliche Struktur vorzuweisen hatten. Solche Duplikate sollen natürlich nicht in die weiteren Schritte des Verfahrens übernommen werden und müssen daher entfernt werden.

3.3.3 Aufbauen der Hierarchie

4 Implementation

5 Auswertung

6 Fazit

Literaturverzeichnis

- [1] BOKELOH, Martin ; WAND, Michael ; SEIDEL, Hans-Peter: A connection between partial symmetry and inverse procedural modeling. In: *ACM SIGGRAPH 2010 Papers*. New York, NY, USA : Association for Computing Machinery, 2010 (SIGGRAPH '10). – URL <https://doi.org/10.1145/1833349.1778841>. – ISBN 9781450302104
- [2] CARLI, Daniel Michelin D. ; BEVILACQUA, Fernando ; TADEU POZZER, Cesar ; D'ORNELLAS, Marcos C.: A Survey of Procedural Content Generation Techniques Suitable to Game Development. In: *2011 Brazilian Symposium on Games and Digital Entertainment*, 2011, S. 26–35
- [3] FREIKNECHT, Jonas: Procedural content generation for games. (2021). – URL <https://madoc.bib.uni-mannheim.de/59000>
- [4] LINDEN, Roland van der ; LOPES, Ricardo ; BIDARRA, Rafael: Procedural Generation of Dungeons. In: *IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games* 6 (2014), Nr. 1, S. 78–89
- [5] MERRELL, Paul: Example-Based Procedural Modeling Using Graph Grammars. In: *ACM Trans. Graph.* 42 (2023), jul, Nr. 4. – URL <https://doi.org/10.1145/3592119>. – ISSN 0730-0301
- [6] RAMANTO, Adhika S. ; MAULIDEVI, Nur U.: Markov Chain Based Procedural Music Generator with User Chosen Mood Compatibility. In: *International Journal of Asia Digital Art and Design Association* 21 (2017), Nr. 1, S. 19–24
- [7] RODEN, Timothy ; PARBERRY, Ian: From Artistry to Automation: A Structured Methodology for Procedural Content Creation. In: RAUTERBERG, Matthias (Hrsg.): *Entertainment Computing – ICEC 2004*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2004, S. 151–156. – ISBN 978-3-540-28643-1

- [8] SMELIK, R.M. ; TUTENEL, T. ; DE KRAKER, K.J. ; BIDARRA, R.: A declarative approach to procedural modeling of virtual worlds. In: *Computers & Graphics* 35 (2011), Nr. 2, S. 352–363. – URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0097849310001809>. – Virtual Reality in Brazil Visual Computing in Biology and Medicine Semantic 3D media and content Cultural Heritage. – ISSN 0097-8493
- [9] TOGELIUS, Julian ; KASTBJERG, Emil ; SCHEDL, David ; YANNAKAKIS, Georgios N.: What is procedural content generation? Mario on the borderline. In: *Proceedings of the 2nd International Workshop on Procedural Content Generation in Games*. New York, NY, USA : Association for Computing Machinery, 2011 (PCGames '11). – URL <https://doi.org/10.1145/2000919.2000922>. – ISBN 9781450308724

A Anhang

A.1 Verwendete Hilfsmittel

In der Tabelle A.1 sind die im Rahmen der Bearbeitung des Themas der Bachelorarbeit verwendeten Werkzeuge und Hilfsmittel aufgelistet.

Tabelle A.1: Verwendete Hilfsmittel und Werkzeuge

Tool	Verwendung
L ^A T _E X	Textsatz- und Layout-Werkzeug verwendet zur Erstellung dieses Dokuments

Erklärung zur selbständigen Bearbeitung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen 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