

Attributierte Grammatiken zur artifiziellen Verfeinerung von 3D-Stadtmodellen

MARTIN KRÜCKHANS¹ & JÖRG SCHMITTWILKEN¹

Zusammenfassung: Attributierte Grammatiken können zur regionstypischen Modellierung von Gebäuden verwendet werden. Eine gebietstypische Darstellung der automatisch abgeleiteten 3D-Modelle ist somit garantiert. Das vorgestellte Verfahren basiert auf der Klassifizierung und Quantifizierung regions- und stiltypischer Merkmale, die in terrestrischen Bildern gemessen und in probabilistische Produktionsregeln überführt werden. Bei der zufallsbasierten Prozessierung der Grammatik entstehen Modelle, die den ermittelten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen genügen.

Die Geometrie der modellierten Gebäudeteile wird durch Lage- und Formparameter in den Attributen der Grammatik-Symbole repräsentiert und durch semantische Regeln im Ableitungsbaum propagiert. Aus diesem Grund lässt sich der Ableitungsbaum in beliebige 3D-Formate wie X3D-oder KML überführen.

1 Einleitung

Die Anwendungsgebiete von 3D-Stadtmodellen erstrecken sich von Simulationen für Hochwasser, Mobilfunkwellen oder Umgebungslärm bis hin zur Bürgerbeteiligung bei großen Bauvorhaben. Hinsichtlich der Visualisierung gehen mit diesen Anwendungsbereichen sehr unterschiedliche Anforderungen einher. Den Simulationsszenarien genügen je nach Simulation mehr oder weniger detaillierte Modelle. Die Texturierung und Visualisierung der Gebäude spielt dort eine eher untergeordnete Rolle. Anders verhält es sich bei der kombinierten Darstellung von geplanten und bestehenden Gebäuden. Hier ist eine photorealistische Darstellung notwendig, um einen realitätsnahen Eindruck der Planung zu bekommen.

Seitdem Anbieter und Dienste wie Google Earth und Google Maps, Microsoft Virtual Earth oder OpenStreetMap flächendeckende Geodaten kostenlos verfügbar machen, spielen diese für touristische Belange eine immer größer werdende Rolle – vermitteln die Luft- und Satellitenbilder, Schrägansichten und teilweise 3D-Stadtmodelle dieser Dienste doch einen wesentlich besseren Eindruck des Urlaubsgebiets als es thematische Karten aus Papier tun. Die Anforderungen an die Visualisierung dreidimensionaler Stadtmodelle für die Tourismusbranche oder das Stadtmarketing kombinieren die anfangs genannten Anforderungen an die Visualisierung. Die Modelle sollen möglichst photorealistisch sein, wenngleich eine exakte Rekonstruktion der Realität für einen nicht ortskundigen Betrachter nicht notwendig ist.

Eine exakte und detaillierte Rekonstruktion von Gebäuden aus Bildern oder LIDAR-Daten für flächendeckende 3D-Modelle ist bestenfalls semi-automatisch möglich. Die automatisierte Verfeinerung existierender, niedrig aufgelöster Modelle durch regionstypische, artifizielle Gebäudedetails schließt diese Lücke. So generierte Detailmodelle sind keine exakte Rekonstruktion der Realwelt, sondern sie stellen vielmehr eine mögliche Erscheinungsform eines Gebäudes dar. Die Erstellung dieser 3D-Stadtmodelle geschieht automatisiert und die einzelnen Gebäudemodelle sehen „so ähnlich“ aus wie die entsprechenden Realweltobjekte.

¹ {krueckhans, schmittwilken}@igg.uni-bonn.de

In diesem Beitrag wird ein Ansatz zum prozeduralen Generieren von synthetischen, gebietstypischen Gebäudefassaden vorgestellt. Primitive Gebäudemodelle niedriger Detaillierungsstufe (Klötzchenmodelle) werden geometrisch und semantisch verfeinert. Die Verfeinerung eines niedrig aufgelösten Gebäudemodells erweitert das Modell um eine regionstypische Fassade und hat nicht die Rekonstruktion des entsprechenden Realweltobjekts zum Ziel. Das existierende Modell wird durch Ableiten einer probabilistischen, attributierten Grammatik semantisch und geometrisch ergänzt. Dabei wird die Grammatik als Formalismus zur Modellierung der Gebäudefassade genutzt. Den Produktionsregeln und den semantischen Regeln liegen Beobachtungen und Häufigkeitsverteilung der Realweltobjekte zugrunde.

Dieser Beitrag fokussiert auf die regionstypische Modellierung der Bonner Südstadt, deren Gründerzeit-Gebäude einerseits sehr prägnant sind, andererseits aber durch eine geringe Anzahl Elementen und ihren Variationen beschrieben werden können.

Die übrigen Abschnitte sind wie folgt gegliedert. Nach einer Übersicht über existierende Arbeiten in den Bereichen synthetische Fassaden und Modellierung von Gebäuden mit formalen Grammatiken in Abschnitt 2 wird die Fassaden-Grammatik und eine prototypische Implementierung in Abschnitt 3 vorgestellt. Abschließend fasst Abschnitt 4 die Ergebnisse zusammen und es werden mögliche weitere Arbeiten aufgezeigt.

2 Synthetische Fassaden

Künstliche Fassadentexturen werden verwendet, wenn die Art der Darstellung eine detaillierte Fassade erfordert oder erwünscht, diese jedoch nicht rekonstruiert werden kann oder soll. Stattdessen werden sinnvolle, aber künstliche, Texturen aufgebracht. Ist es für eine Anwendung nicht nötig detailgetreue Abbilder der Realität zur präsentieren, so stellt diese Art der Texturierung eine leicht automatisierbare, schnelle und somit kostengünstige Alternative dar.

COORS (2008) und BAUER ET AL. (2008) verwenden synthetische Texturen für 3D-Stadtmodelle bei der Fußgängernavigation zur kostengünstigen und realitätsnahen Texturierung der Modelle. BAUER ET AL. stellen darüber hinaus noch eine XML-basierte Spezifikation für synthetische Texturen vor.

JOBST ET AL. (2008) und DÖLLNER ET AL. (2005) präsentieren Arbeiten zur nicht-photo-realistischen Texturierung von 3D-Stadtmodellen. Sie thematisieren unter anderem die, aus der 2D Kartographie bekannten, grafischen Variation. Die Autoren heben neben Effizienzvorteilen nicht photorealistischer Texturen auch die Verwendbarkeit für thematische Visualisierungen hervor.

Alle genannten Arbeiten basieren auf der synthetischen Texturierung von Fassaden. Eine weitere Möglichkeit der Erhöhung des Detaillierungsgrads ist die Erhöhung der geometrischen Details. Für 3D-Gebäude- oder Stadtmodelle sind vor allem Arbeiten zur prozeduralen Modellierung der Objekte zu nennen. Im Folgenden werden einige Arbeiten vorgestellt, die diesen prozeduralen Ansatz verfolgen. Sie basieren auf dem Konzept formaler Grammatiken, das von Chomsky (1956, 1959) zur Beschreibung natürlicher sowie formaler Sprachen begründet und von Knuth (1968,1971) durch Attribute erweitert wurde. Die von Knuth vorgestellten attributierten Grammatiken waren zur Syntaxanalyse von Programmiersprachen konzipiert und fanden anfänglich vor allem im Compilerbau AHO ET AL. (1999) Anwendung.

WONKA ET AL. (2003) präsentieren einen Ansatz, den sie als Splitgrammatik (split grammar) bezeichnen. Ihre Arbeit basiert auf der von DUARTE (2002) vorgestellten diskursiven Formen-

Grammatik (shape grammar). Der „Split-Teil“ der Grammatik führt eine Tessellation einer zweidimensionalen (Fassaden)Fläche durch. Zur Überwachung der Produktion werden die geometrischen Symbole attribuiert. Die Attribute legen zugleich das Erscheinungsbild der Symbole fest. MÜLLER ET AL. (2006) erweitern das Konzept der Splitgrammatiken um Transformation und Rotation der generierten Objekte. Sie nutzen das Konzept zur prozeduralen Modellierung von Fassaden. Dabei werden die Symbole entsprechend der constructive solid geometry (CSG) MÄNTYLÄ (1988) behandelt. So genannte „snap lines“ garantieren die visuelle Korrektheit z.B. von Fensterreihen benachbarter Gebäudeteile. LARIVE & GAILDRAT (2006) stellen eine Fassadengrammatik (wall grammar) vor, die synthetisierte Gebäude erzeugen, deren Grundriss und Höhe gegeben sind. Das Aussehen der Fassaden basiert auf s.g. „wall panels“, die als atomare Objekte durch die Grammatik auf der Fassade angeordnet werden.

3 Bonner-Südstadt-Fassaden-Grammatik

3.1 Datengrundlage

Zur Erstellung einer Grammatik, die eine regions- und stil-typische Bausubstanz qualitativ und quantitativ repräsentiert, werden Häufigkeitsverteilungen und geometrische Eigenschaften von Fassadenelementen benötigt. Die erstellten Produktionsregeln und semantischen Regeln der Grammatik implementieren diese und stellen somit die Vielfalt und Geometrie der erzeugten Modelle sicher. Durch die Verwendung terrestrischer Fassadenaufnahmen wird hier diesen Anforderungen entsprochen. Zum einen werden Frontalaufnahmen zur Klassifizierung und Quantifizierung von stil-typischen Merkmalen und zum anderen multiperspektivische Bildserien zur Dimensionierung von Fassadenelementen verwendet.



Abb. 1: Frontalaufnahmen typischer Bonner Südstadthäuser

Die Frontalaufnahmen werden hierbei nur von Fassaden erstellt, die dem regionstypischen Stil entsprechen. Die Interpretation des Stils, also die Entscheidung welches Haus südstadttypisch ist, wird dabei an Hand von stil-typischen Merkmalen vorgenommen. In der Bonner Südstadt sind beispielsweise zwei- bis dreigeschossige Gebäude, aufwändige Ornamente oder verzierte Balkone stil-typisch.

Insgesamt wurden von 200 Gebäuden dieses Stils Frontalaufnahmen erstellt, mit dem Zweck Merkmale des Baustils der Bonner Südstadt wie beispielsweise die Häufigkeiten von Balkonen, Dachgauben oder Ornamente, zu quantifizieren.

Neben den Merkmalen selbst sind Informationen ihrer geometrischen Eigenschaften wesentlich. Die Ableitung von Maßen (z.B. Breite, Höhe, Tiefe und Form eines Balkons) ist jedoch mit Hilfe einfacher Frontalaufnahmen nur bedingt möglich. Aus diesem Grund wurden multiperspektivische Bildserien wie in Abbildung 2 verwendet. Durch die von Labe & Förstner (2006) beschriebene Methode der automatischen relativen Orientierung lassen sich Maße dreidimensionaler Art aus Bildserien eines Objekts bestimmen. Die Methode beruht auf dem Matching homologer Punkte und anschließender Bündelausgleichung, wodurch die Bildserie automatisch relativ orientiert wird. Zur Herstellung der absoluten Orientierung muss die Dimension des Systems festgelegt werden indem die Projektionsmatrix jedes Bildes einer Serie mit einem Maßstab (z.B. die vor Ort gemessene Eingangsbreite) skaliert wird. Die Ableitung von Maßen erfolgt dann durch Berechnung des Strahlenschnitts (räumlicher Vorwärtsschnitt) mit den skalierten Projektionsmatrizen des absolut orientierten Systems.

Die Breite eines Fensters erhält man bspw. durch Auswählen der 2D Bildpunkte der Fensterecken in jedem Bild und anschließender Projektion in den dreidimensionalen Objektraum durch Berechnung des Strahlenschnitts. Das Ergebnis sind zwei dreidimensionale Objektpunkte deren euklidischer Abstand der gesuchten Fensterbreite entspricht. Bildserien dieser Art wurden von 20 Gebäuden der Bonner Südstadt erstellt.



Abb. 2: Multiperspektivische Aufnahmeserie eines Gebäudes

3.2 Ableiten von Produktionsregeln

Mit dem Ziel 3D-Gebäudemodelle eines konkreten Stils mit attribuierten Grammatiken automatisch generieren zu können, gehen zwei Forderungen einher. Zum einen muss die Geometrie von Gebäuden generisch beschrieben werden und zum anderen muss gewährleistet sein, dass generierte Gebäude dem zu repräsentierenden Stil entsprechen. Diese Anforderungen werden im Folgenden näher betrachtet.

Zur generischen Beschreibung der Geometrie wird der Formalismus der Splitgrammatiken (WONKA ET AL. (2003), MÜLLER ET AL. (2006)) verwendet, da diese eine Tesselation der zu „splitenden“ Flächen erzeugen und somit eine topologisch korrekte Zerlegung der Fassadenfläche ermöglichen. Im hier vorgestellten Verfahren werden Splitgrammatiken verwendet, um Gebäudefassaden symbolisch nach geometrischen und semantischen Kriterien zu zerlegen. Durch rekursive Regelanwendung wird die Fassade, ausgehend von einem Rechteck, zerlegt, so dass abschließend alle Fassadenelemente durch Symbole der Grammatik beschrieben werden (vgl. Abbildung 3).

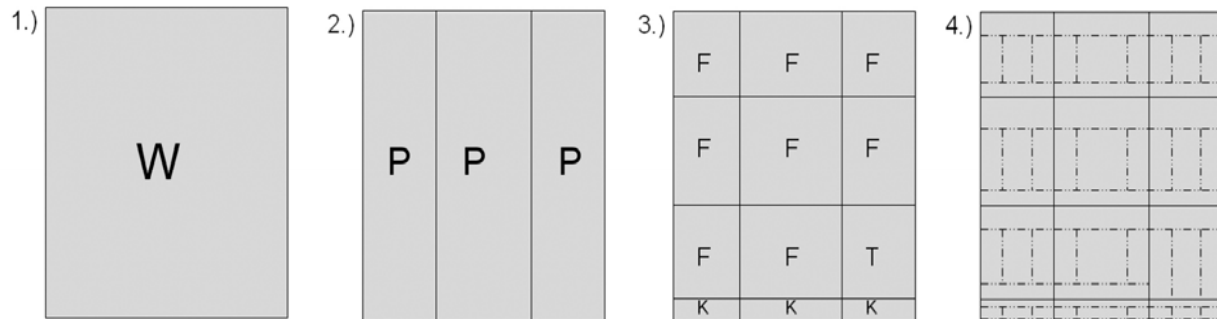


Abb. 3: Hierarchische Zerlegung einer Fassade durch rekursive Anwendung der Splitgrammatik. Symbole: W = Wandfläche, P = planare Fassadenfläche, F = Fensterfläche, K = Kellerfensterfläche, T = Türfläche)

Die Generierung von 3D-Modellen eines gegebenen Stils setzt die Kenntnis von stil-typischen Merkmalen und deren Häufigkeiten voraus. Hierzu werden die quantifizierten Häufigkeiten von Fassadenelementen in Produktionsregeln der Splitgrammatik berücksichtigt. Die Fassadenelemente werden durch Grammatik-Symbole repräsentiert und durch (mehrfache) Regelanwendung aus dem Startsymbol (W = Wandfläche) abgeleitet. Die Wahrscheinlichkeit der einzelnen Produktionsregeln entspricht dabei der Häufigkeit des zu produzierenden Symbols bzw. Fassadenelements.

Es sollte beispielsweise die Zerlegung einer Fassadenwand W in planare Fassadenflächen P in einer Produktionsregel formuliert werden. Dazu wurde aus den Fassadenaufnahmen abgeleitet, dass Gebäude der Bonner Südstadt zu 27% zwei- und 73% dreigeteilt sind. Daraus ergeben sich die in Tabelle 1 gezeigten Produktionsregeln.

Tab. 1: Beispiel von Produktionsregeln zur Zerlegung einer Fassadenfläche

Bezeichnung	Wahrscheinlichkeit	Kontext	Klartext
P1	0.27	$W \rightarrow P P$	zweigeteilt
P2	0.73	$W \rightarrow P P P$	dreigeteilt

Durch die entsprechende Formulierung aller Produktionsregeln für wesentliche Fassadenelemente entsteht eine Grammatik, die die südstadttypische Fassadengeometrie generisch beschreibt. Diese Methode lässt jedoch die Formulierung von detaillierten Fassadenelementen auf Grund der begrenzten Anzahl von Fassadenaufnahmen nicht zu, da bedingte Wahrscheinlichkeiten im De-

tailbereich nicht identifiziert werden können. Um beispielsweise die Häufigkeit von Balkonen bei zweigeteilten Fassaden zu bestimmen, können nur die Aufnahmen von Gebäuden herangezogen werden, die tatsächlich zweigeteilte Fassaden besitzen. Das heißt, dass in diesem Beispiel nur noch 27% der ursprünglich 200 Aufnahmen verwendet werden können. Dies führt im Allgemeinen zu der Beziehung: Je detaillierter das Fassadenelement, desto kleiner die Menge der zur Verfügung stehenden Fassadenaufnahmen, woraus folgt, dass ab einer gewissen Detailtiefe keine bedingten Wahrscheinlichkeiten mehr abgeleitet werden können.

Aus diesem Grund wird nach der „groben“ Strukturierung der Fassade (vgl. Abbildung 3) keine weitere Zerlegung der entstandenen Flächen mit Splitgrammatiken durchgeführt. Die noch zu erzeugenden Fassadenelemente wie Fenster, Türen, Ornamente, Balkone usw. werden stattdessen zu Prototypen zusammengefasst. Abbildung 4 zeigt die Prototypen für Fenster.

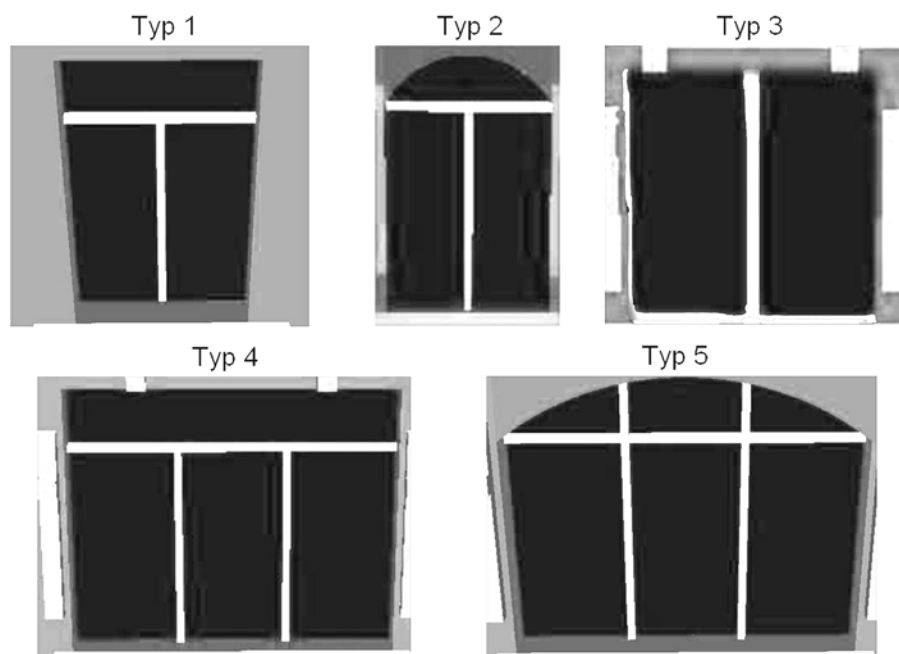


Abb. 4: Identifizierte Fenster-Prototypen

Die vom letzten Schritt der Splitgrammatik erzeugten Flächen (Symbole) werden durch Produktionsregeln in die jeweiligen Prototypen überführt. Die Wahrscheinlichkeit der einzelnen Produktionsregeln wird in erster Linie aus den absoluten Häufigkeiten des zu erzeugenden Prototyps in allen Fassadenaufnahmen hergeleitet.

Darüber hinaus unterliegt die Wahl der anzuwendenden Produktionsregel dem Kontext, der durch die Geometrie des Elternknotens im Ableitungsbaum definiert ist. So ist die Wahl eines bestimmten Fenster-Prototypens von der Breite des ihn umgebenden Fassadenteils abhängig. Tabelle 2 veranschaulicht dies. Durch die angeführten Bedingung wird ausgeschlossen, dass augenscheinlich breiten Fenstertypen auf schmalen Flächen generiert werden.

Tab 2: Zuordnung von Fenstertypen je nach Breite des Fensters

<p style="text-align: center;">[<i>schmale Fenster</i> \leq <i>normale Fenster</i> \leq <i>breite Fenster</i>]</p> <p style="text-align: center;"><i>schmale Fenster</i> \rightarrow <i>Typ 1-3</i></p> <p style="text-align: center;"><i>normale Fenster</i> \rightarrow <i>Typ 1-5</i></p> <p style="text-align: center;"><i>breite Fenster</i> \rightarrow <i>Typ 4-5</i></p>

Die Auswahl des Fenstertyps kann also sowohl *-ohne-* als auch *-mit-* der Betrachtung der Fensterbreite durchgeführt werden und stellt eine Art Mischform der Ansätze dar, ob bedingte oder absolute Wahrscheinlichkeiten verwendet werden.

Ein Beispiel für ein Fassadenelement welches immer ohne bedingte Wahrscheinlichkeiten betrachtet wird, ist die Auswahl des Geländers an der Eingangstreppe. Ein Treppengeländer kann entweder *-gar nicht-*, *-links-*, *-rechts-* oder *-links und rechts-* vorhanden sein. Die Auswahl wird hierbei unabhängig von anderen geometrischen Eigenschaften getroffen und ist nur von den absoluten Wahrscheinlichkeiten abhängig.

Die Erstellung einer Grammatik zur automatischen Generierung regions- und stil-typischer 3D-Modelle wird zusammenfassend mit zwei Ansätzen fließenden Übergangs umgesetzt. Während bei eher groben Fassadenstrukturen die hierarchische Zerlegung durch Splitgrammatiken verwendet wird, müssen bei steigendem Detaillierungsgrad auf Grund nicht identifizierbarer bedingter Wahrscheinlichkeiten, Fassadenelemente durch generalisierte und katalogisierte Prototypen verteilungstreu dargestellt werden.

3.3 Implementierung

Zur Implementierung der Grammatik wurde das von den Autoren mitentwickelte Projekt XGep (<http://www.igg.uni-bonn.de/xgep>) verwendet. XGep besteht aus einem XML Schema für Grammatiken und einer grafischen Oberfläche zum Editieren, Prozessieren und Visualisieren attributierter, probabilistischer Grammatiken. Die hier vorgestellte Grammatik wurde in einem entsprechenden XML-Dokument definiert. Es wurden Ableitungsbäume mit zufälligen Startwerten (Fassadenmaße) generiert und geometrisch interpretiert. Letzteres überführt die Lage- und Formparameter (Attribute) der Symbole in eine dreidimensionale, visualisierbare Form wie X3D oder KML. Jedes Blatt des Ableitungsbaums repräsentiert ein bestimmtes Gebäudeteil, die Gesamtheit aller Blätter stellt also das gesamte Gebäude dar. Die inneren Knoten zeigen ausschließlich die „Entstehung“ der Gebäudeteile und somit ihre Semantik.

Zur Positionierung einzelner Fassadenelemente in der 3D-Darstellung werden die Attribute der Lage- und Formbeschreibung der Symbole verwendet. Ausgehend von einem Ursprung der Fassade in der linken unteren Ecke und einem gewählten rechtwinkligen Koordinatensystem, werden alle Elemente absolut in diesem System beschrieben. Jedes Fassadenelement verwendet dabei drei Attribute zur Position (x, y und z), drei zur Dimension (Länge, Breite und Tiefe im Bezug auf das Ursprungssystem) und eins zur Rotation um die Hochachse der Fassade. Weitere Ro-

tationen werden bei der symbolischen Zerlegung der Fassade nicht definiert, da sie in der Fassadengeometrie des regionstypischen Stils der Bonner Südstadt nicht vorkommen.



Abb. 5: Ablaufschema zur Generierung hoch detaillierter Fassaden auf Basis einer Datenbank

Die vorgestellte Grammatik kann insbesondere zur Verfeinerung und Veredlung detailarmer 3D- Stadtmodelle verwendet werden. Im Folgenden wird dies für eine Datenbank mit LoD 1 Modellen der Bonner Südstadt skizziert. Abbildung 5 zeigt ein Ablaufschema.

Zunächst ist eine kleine Modifizierung der oben beschriebenen Grammatik notwendig. Die Startwerte, also die Attribute des Startsymbols wie Lage, Breite und Höhe der Fassade, werden nicht mehr zufallsbedingt erzeugt, sondern sequenziell für jedes Gebäude aus der Datenbank abgefragt. Aus der Datenbank werden also der Grundriss eines Gebäudes (Lage, Breite und Tiefe) und die entsprechenden Höhe entnommen und der Grammatik als Input übergeben. Durch Ableitung der Grammatik, beginnend mit diesen Startwerten, wird das Gebäudemodell so artifizial verfeinert

Abbildung 6 zeigt auszugsweise das so erzeugte, hoch detaillierte 3D Stadtmodell im regionstypischen Stil der Bonner Südstadt .

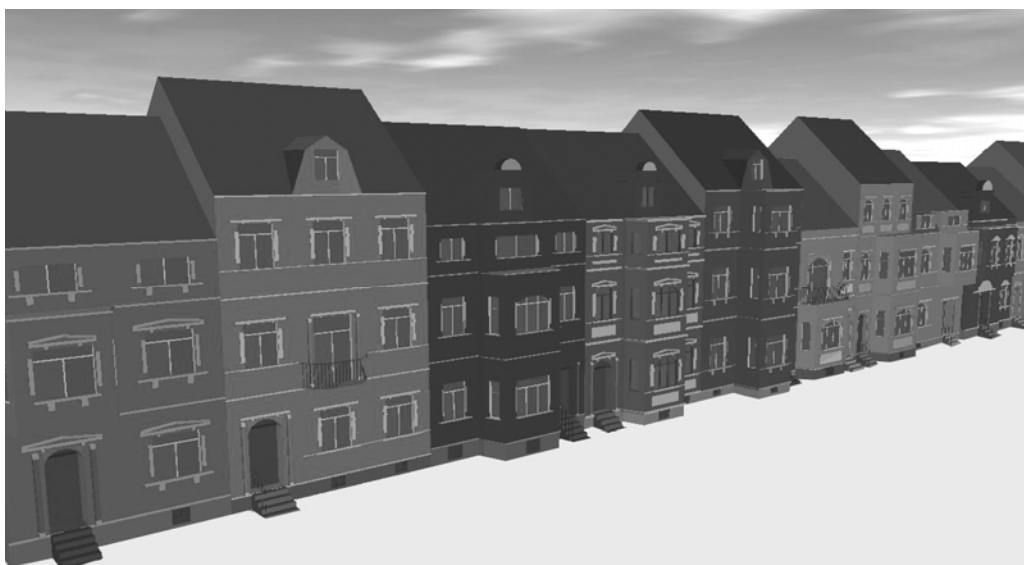


Abb. 6: Generiertes 3D Modell eines Straßenzugs der Bonner Südstadt

4 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde die Verwendung synthetischer Fassaden zur artifiziellen Erhöhung des Detaillierungsgrads von 3D-Stadtmodellen vorgestellt. Am Beispiel der markanten Gründerzeit-Gebäude der Bonner Südstadt wurde eine attributierte Grammatik entwickelt, die die Fassaden existierender Gebäudemodelle geometrisch und semantisch verfeinert. Die Produktionsregeln und semantischen Regeln der Grammatik basieren auf der Auswertung terrestrischer Bilder. Die so ermittelten Grenzwerte und Wahrscheinlichkeiten steuern die Prozessierung der Grammatik. Die Prozessierung der Grammatik ist in zwei Phasen zu unterteilen: In der ersten Phase wird die Fassadenfläche im Sinne von Splitgrammatiken in Stockwerke und Erker zerlegt. In der zweiten Phase werden Produktionsregeln durch die zugrunde liegenden Verteilungen so gesteuert, dass die Terminalsymbole (Türen, Fenster, Ornamente usw.) innerhalb einer Fassade und zwischen unterschiedlichen Gebäuden entsprechend variieren. Die iterative Anwendung des vorgestellten Verfahrens auf eine 3D-Stadtmodell-Datenbank wurde ebenfalls vorgestellt.

In zukünftigen Arbeiten sollte die Modellierbarkeit anderer Gebäudetypen mit der vorgestellten Art von Grammatik untersucht werden. Da die Gebäude der Bonner Südstadt durch wenige Regeln beschrieben werden können, ist zu prüfen, ob auch andere Arten von Gebäuden, Stilepochen oder Stadtteilen derart modelliert werden können. Liegt erst einmal ein umfangreicher Datenbestand von Grammatikregeln bzw. modellierter Gebäudetypen vor, so sollten diese Gebäudetypen automatisiert oder semi-automatisch in 3D-Stadtmodellen identifiziert werden.

Anmerkung

Die hier vorgestellten Ergebnisse stammen aus einer Bachelorarbeit des ersten Absolventenjahrgangs des Bachelor-Studiengangs Geodäsie und Geoinformation der Universität Bonn. Die vollständige Arbeit ist unter folgender Adresse verfügbar:

http://www.ikg.uni-bonn.de/uploads/tx_ikgpublication/BachelorarbeitMartin_Krueckhans.pdf

Literaturverzeichnis

- AHO, A. V., SETHI, R. & ULLMAN, J. D., 1999: Compilerbau, Teil 1. Oldenbourg.
- BAUER, M., COORS, V. & ZIPF, A., 2008: Zur Nutzung von 3D-Stadtmodellen für mobile Navigationssysteme. In: 2008: Proceedings of GI Days, Münster, 2008.
- CHOMSKY, N., 1956: Three models for the description of language. *Information Theory, IEEE Transactions*, **3** (2), S. 113-124.
- CHOMSKY, N., 1959: On Certain Formal Properties of Grammars. *Information and Control* (2), S. 137-167.
- COORS, V., 2008: Synthetic Textures for 3D Urban Models in Pedestrian Navigation. In: BRANKI ET AL 2008: Techniques and Applications for mobile Commerce, Proceedings of TAMoCo 2008, S. 46-53.
- DÖLLNER, J., BUCHHOLZ, H., NIENHAUS, M. & KIRSCH, F., 2005: Illustrative Visualization of 3D City Models. In: ROBERT F. ERBACHER; JONATHAN C. ROBERTS; MATTI T. GROHN; KATY BORNER 2005: Proceedings of Visualization and Data Analysis 2005 (Electronic Imaging 2005, January 16-20, 2005, San Jose, California, USA), S. 42 - 51.
- DUARTE, J. P., 2002: Malagueira Grammar - towards a tool for customizing Alvaro Siza's mass houses at Malagueira.

- JOBST, M., KYPRIANIDIS, J. E. & DÖLLNER, J., 2008: Mechanisms on Graphical Core Variables in the Design of Cartographic 3D City Presentations. In: MOORE; DRECKI 2008: Geospatial Vision, S. 45-59.
- KNUTH, D. E., 1968: Semantics of context-free languages. *Theory of Computing Systems*, **2** (2), S. 127-145.
- KNUTH, D. E., 1971: Top-down Syntax Analysis. *Acta Informatica*, **2** (1), S. 79-110.
- LÄBE, T. & FÖRSTNER, W., 2006: Automatic Relative Orientation of Images. In: 2006: Proceedings of the 5th Turkish-German Joint Geodetic Days.
- LARIVE, M. & GAILDRAT, V., 2006: Wall grammar for building generation. In: 2006: GRAPHITE '06: Proceedings of the 4th international conference on Computer graphics and interactive techniques in Australasia and Southeast Asia, S. 429-437.
- MÄNTYLÄ, M., 1988: An Introduction to Solid Modeling. *Principles of Computer Science*. Computer Science Press.
- MÜLLER, P., WONKA, P., HAEGLER, S., ULMER, A. & VAN GOOL, L., 2006: Procedural Modeling of Buildings. In: 2006: Proceedings of ACM SIGGRAPH 2006 / ACM Transactions on Graphics (TOG) ACM Press, S. 614-623.
- WONKA, P., WIMMER, M. & WILLIAM, F. S., 2003: Instant Architecture. *ACM Transactions on Graphics*, **4** (22), S. 669-677.