

Über die schrittweise Erstellung und Verfeinerung von Modellhypothesen für Gebäude

DIRK DÖRSCHLAG, GERHARD GRÖGER & LUTZ PLÜMER, Bonn

Keywords: Formale Grammatiken, Gebäuderekonstruktion, Modellselektion, Skalen

Summary: *About the Stepwise Generation and Refinement of Model Assumptions for Buildings.* This paper focuses on the stepwise generation and refinement of model hypotheses for the reconstruction of 3d buildings, based on image or laserscan data. An approach is presented, which uses attributed formal grammars. It starts with the largest components and proceeds stepwise from one scale to the next finer scale allowing a generic generation of a wide variety of highly detailed building hypotheses. This also allows a sequential validation of extension or refinement steps by model selection. The grammar presented in this paper is intended to produce models build up from aggregated cuboids and with a complex floor plan. In the future, the level of detail of the resulting model will be controlled by model selection.

Zusammenfassung: Dieser Artikel fokussiert auf die schrittweise Erstellung und Verfeinerung von Modellhypothesen für einen auf Bild- oder Laserdaten aufsetzenden Rekonstruktionsprozess für dreidimensionale Gebäudemodelle. Hierzu wird eine formale attributierte Grammatik verwendet. Das Erzeugen der Modellhypothese beginnt mit den größten Bestandteilen, den Geschosskörpern, die definierte Übergänge zu feineren Bestandteilen wie Dachgauben oder Schornsteinen aufweisen. Dieses Vorgehen ermöglicht generisch die Erzeugung vielfältiger detaillierter Modellhypothesen, die sequentiell durch Modellselektion gesteuert wird. Die mit der hier präsentierten Grammatik produzierbaren Modelle eignen sich trotz der einfachen Basiskörper zur Erzeugung von Gebäudemodellen mit sehr komplexen und nicht rechtwinkligen Grundrissen. Insbesondere durch die Einbindung in Modellselektionsverfahren wird in Zukunft der Detaillierungsgrad der entstehenden Modelle gesteuert.

1 Einleitung

Die Rekonstruktion von Gebäudemodellen aus Massendaten wie Luftbildern und LIDAR-Daten ist ein wichtiges, relevantes wissenschaftliches Problem, das bisher nicht zufrieden stellend gelöst ist. Im Allgemeinen beinhalten Verfahren für die Rekonstruktion folgende Schritte:

1. Erfassung der Rohdaten
2. gegenseitige Registrierung von Rohdaten aus unterschiedlichen Quellen (z. B. Luftbild und Laserscan)
3. Gruppierung der Rohdaten zu größeren klassifizierbaren Einheiten (z. B. Punkte zu Ebenen)
4. Klassifikation

Bei der Erfassung der Ausgangsdaten ist heutzutage eine gute Basis erreicht, was Verfügbarkeit, Auflösung und Qualität der Daten anbelangt. Laserdaten aus Befliegungen sind oft flächendeckend vorhanden, etwa in Nordrhein-Westfalen. Zusätzlich sind teilweise auch terrestrisch erfasste Daten verfügbar. Viele Systeme ermöglichen zudem eine gleichzeitige Erfassung von Geometrie und zugehörigen Farbinformationen (ABMAYR et al. 2004). Auch im Bereich der gegenseitigen Registrierung der Rohdaten gab es sowohl in der Photogrammetrie als auch im Bereich Computer Grafik große Fortschritte (siehe auch (BORNAZ et al. 2003) oder (KAHLEZ et al. 2007)), so dass eine qualitativ hinreichende Registrie-

rung der Eingangsdaten kein Problem darstellt.

Für die Gruppierung der Rohdaten gibt es ebenfalls bereits eine Reihe verfügbarer Verfahren, die z. B. alle zu einer Ebene gehörigen Punkte in einer Punktmenge gruppieren können. Beispiele für leistungsfähige, etablierte Verfahren sind *Clustering* (MIERSWA et al. 2006) und *RANSAC* (FISCHLER & BOLLES 1981).

Für die spätere Nutzung der Daten bei Analysen muss neben der Geometrie auch die Semantik rekonstruiert werden. Diese *Klassifikation* eröffnet die Möglichkeit, Vorwissen über die jeweiligen Objekte in den Prozess einzubringen. Wichtige Vorbedingung für den Klassifikationsprozess ist die Verfügbarkeit von Modellen, welche in der Lage sind, die Daten zu erklären. Unter *Modell* verstehen wir die Einheit aus einem mathematischen Modell, im Folgenden *Modellklasse* genannt, und einem konkreten Parametersatz; dieser wird als *Modellparameter* bezeichnet. Diese Modelle werden im Schritt der Modellselektion mit den Daten verglichen und das am besten zu den Daten passende wird gewählt. An dieser Stelle ist es wichtig, eine Abwägung zwischen Modellkomplexität und Güte der Anpassung zu treffen, um eine Über- oder Unteranpassung zu vermeiden. Dies leisten Informationskriterien wie z. B. das *Akaike Informationskriterium – AIC* (AKAIKE 1974); hier wird die Güte der Zuordnung durch statistisch begründete Ähnlichkeitsmaße beschrieben.

Die Bereitstellung von geeigneten Gebäudemodellen für die Rekonstruktion von komplexeren Gebäuden ist durch die große Vielfalt und Kombinierbarkeit der elementaren Bestandteile schwierig und durch Aufzählung aller Alternativmodelle aufgrund der kombinatorischen Explosion der Möglichkeiten praktisch nicht durchführbar.

In diesem Artikel wird ein Ansatz vorgestellt, diesem Dilemma zu begegnen. Hierzu werden die für die Modelle notwendigen generischen Primitive und die Aggregationsmechanismen identifiziert. So ist es möglich, die komplexen Modelle nach Bedarf zusammenzubauen bzw. die Modelle schrittweise anzupassen und somit zu verbessern. Dieser

Artikel präsentiert ein Verfahren, das – basierend auf dem aus der Informatik stammenden Konzept der *formalen Grammatik* – die notwendigen alternativen Modellklassen aus Modellklassenprimitiven zu erstellen und verfeinern versucht. Gebäude sind Strukturen mit einer unter Umständen sehr hohen Komplexität in ihrer Form und somit auch in deren geometrischer Beschreibung. Eindrucksvolle Beispiele der möglichen Komplexität sind insbesondere in Innenstadtbereichen mit historischer Bebauung, die z. B. aus der Gründerzeit stammen, zu finden. Dennoch eröffnet die Sprache ein generisches Konzept, um Gebäudeformen zu beschreiben. Die komplexe Gesamtstruktur wird hierbei in kombinierbare Komponenten zerlegt. Ähnlich gehen auch CAD-Systeme vor, bei welchen das Gebäude aus vorher spezifizierten parametrisierten Teilen zusammengesetzt wird. Die Komposition dieser Komponenten ist jedoch nicht völlig beliebig, sondern unterliegt Regeln. Diese Regeln ergeben sich aus dem spezifischen Zweck der Komponenten, den diese im Gesamtkontext des Gebäudes erfüllen müssen, und den physikalischen Gesetzen.

STEINHAGE (1998) erzeugt Modellklassen aus einfachen Komponenten auf Basis der von (STINY 1982) vorgestellten *Gestaltgrammatiken* (*shape grammars*) für die Rekonstruktion. Das Verfahren setzt Gebäudemodelle aus Gebäudeendstücken (*Terminalen*) und -verbindern (*Konnektoren*) zusammen. Terminale und Konnektoren sind offene Modellkörper mit mindestens einer definierten Anschlussöffnung (*plug face*). Da die Anschlussöffnungen jedoch integraler Bestandteil der Primitive sein und für zwei verbindbare Teile die gleiche Gestalt haben müssen, ist es nicht möglich, eine gewünschte Detailrekonstruktion mit einer handhabbaren Menge von Primitiven zu erreichen. Eine Verfeinerung der erzeugten Modelle ist somit in diesem Ansatz ausgeschlossen.

Eine formale Grammatik, die auf dem Konzept der *set grammar* (STINY 1982) aufbaut, wird bei (MÜLLER et al. 2006) verwendet. Die Geometrie ist hierbei in impliziter Form an die Bestandteile der Grammatik gebunden. Gleichzeitig werden Bedin-

gungsgleichungen verwendet, um Vorwissen über z. B. Mindest- oder Höchstwerte von Gebäudeparametern in den Produktionsprozess zu integrieren. Zusätzlich wird ein von (DUARTE 2002) in seiner Doktorarbeit erstmals verwendetes Konzept der Aufteilung eines bereits existenten räumlichen Objektes in Bestandteile in das System integriert und von (WONKA et al. 2003) in eine *split grammar* überführt. Hierbei wird ein Symbol mit geometrischer Form in eine Menge von Symbolen mit disjunkten, sich nur am Rand berührenden geometrischen Formen gleicher Dimension gespalten. Notwendige Voraussetzung für die Anwendung des Grammatikkonzepts ist der *scope*, der den maximal verfügbaren Raum für ein Gebäude umfasst (MÜLLER et al. 2006). Nachteilig macht sich das *scope*-Konzept vor allem im Rekonstruktionsverfahren bemerkbar, da die Bestandteile des *scope* nicht direkt beobachtbar sind, was die Steuerung der Generierung auf Basis der Beobachtungen verhindert. Die Verwendung des Konzeptes der *set grammars* hat zudem den Nachteil, dass Geometrien und ihre Bedingungen in diesem Formalismus nicht vollständig und explizit repräsentiert sind. Dies ist insbesondere für die Rekonstruktion von Nachteil, da diese vorhandenen Informationen dort dann nicht nutzbar sind.

Dass Teile des in (MÜLLER et al. 2006) vorgestellten Verfahrens sich auch für Rekonstruktionsprozesse eignen, wird am Beispiel der Fassadenrekonstruktion deutlich (MÜLLER et al. 2007). Ein ähnlicher Ansatz wird auch bei (RIPPERDA & BRENNER 2007) verfolgt. Beide Gruppen stützen sich hierbei auf die Rekonstruktion auf Basis von terrestrischen Bildern. Die in diesem Ansatz eingesetzten Grammatiken adressieren jedoch im Unterschied zu den in diesem Artikel vorgestellten ein zweidimensionales Problem und setzen ein hohes Maß an Symmetrien in den zu rekonstruierenden Fassaden voraus. Das Problem der Fassadenrekonstruktion wird hier nicht weiter behandelt; es ist mit dem hier vorgestellten Verfahren kombinierbar.

Dieser Artikel gliedert sich im Weiteren wie folgt: In Abschnitt 2 wird der Weg von einer Ontologie zu einer attribuierten

Grammatik vorgestellt, sowie ein Verfahren zur Zuordnung zwischen Modellhypothesen und Daten beschrieben. Abschnitt 3 stellt eine attribuierte Grammatik zur Erzeugung von Gebäudemodellen grober Auflösung vor. Der Artikel endet mit einem Ausblick auf die Erweiterung der Grammatik für Modellhypothesen mit Dächern und Gauben.

2 Von Ontologien zu attribuierten Grammatiken zur Erzeugung von Modellhypothesen für Gebäude

Eine Möglichkeit, Wissen über die Welt zu sammeln, zu analysieren und zu formalisieren sind *Ontologien*. Im Rahmen der Erstellung einer Ontologie werden die zwischen den Objekten und den Objektklassen bestehenden mereologischen (Bestandteilsrelationen), topologischen (Nachbarschaftsrelationen) und taxonomischen Beziehungen herausgearbeitet. Insbesondere die mereologischen und topologischen Beziehungen enthalten Information, die in Regeln für den Aufbau von Gebäuden aus Komponenten abbildbar sind. Ein weiterer Aspekt einer Ontologie sind die Relationen zwischen einem Begriff, dem zugehörigen physischem Körper und seiner geometrischen Repräsentation. Dieser Aspekt führt zu einer Analyse der notwendigen inneren Restriktionen, denen die Geometrie eines Gebäudeteils unterliegt und zur Identifikation von Konfigurationen, anhand welcher Geometrien klassifiziert werden können. Jede Konfiguration besitzt erstens eine geometrische Interpretation. Zweitens besitzt sie eine Menge von Eigenschaften, welche erfüllt sein müssen, z. B. die Geschlossenheit der Gebäudehülle. Drittens besitzt jede Konfiguration einen Bezug zur Ontologie und somit eine Einbettung in die mereologische und topologische Gesamtstruktur des Gebäudes.

Ein Mechanismus, um aus Komponenten und Regeln komplexe Strukturen zu generieren oder diese zu zerlegen, sind *formale kontextfreie Grammatiken*, wie sie z. B. von (CHOMSKY 1959) beschrieben werden. Zentrale Elemente sind zum einen die Symbole, welche im Kontext dieser Arbeit Komponenten eines Gebäudes repräsentieren, und

Produktionsregeln, die beschreiben wie ein Symbol verändert, ergänzt oder ersetzt werden darf. Zur Repräsentation der oben beschriebenen Konfigurationen ist das Konzept noch um Attribute für die Symbole und semantische Regeln zu einer *attributierten Grammatik* (KNUTH 1968) zu ergänzen. Ein Symbol der Grammatik für Gebäude trägt somit eine Semantik, z. B. Geschoss, und in den Attributen die Parameter der assoziierten Geometrie sowie eine Repräsentation ihrer charakteristischen Eigenschaften. Die semantischen Regeln haben hierbei zwei Aufgaben. Die erste ist die Verknüpfung der Attribute der über eine Produktionsregel angewendeten verknüpften Symbole. Die zweite Funktion ist es, Bedingungen für die Anwendbarkeit einer Produktionsregel zu formulieren.

Als Mechanismus zur Repräsentation der charakteristischen Eigenschaften wird ein Graph, der *Constraint-Graph*, gewählt, dessen Knoten für jeweils ein geometrisches Element stehen und dessen Kanten geometrische oder topologische Bedingungen (*Constraints*) repräsentieren, welche zwischen den Knoten oder für die Knoten gelten. Es gibt zwei unterschiedliche Constraint-Graphen. Der erste wird mit der Grammatik generiert und der zweite wird aus den Eingangsdaten, in der Regel Laser-scan-Daten, hergeleitet. Die beiden Graphen können über Graphzuordnungsverfahren miteinander verglichen werden. Somit eröffnet die Grammatik eine Möglichkeit, Hypothesen für Gebäudemodelle zu erzeugen, mit deren Hilfe die Eingangsdaten über die Graphzuordnung klassifiziert werden können. Durch die Grammatik können die Modellhypothesen zudem zielgerichtet generiert werden, da eine Entscheidungsfunktion die nächste anzuwendende Produktionsregel auswählt. Hierbei ist es möglich, als Entscheidungsfunktion die in der Einleitung erwähnten Verfahren der Modellselektion in den generativen Prozess zu integrieren.

Im Folgenden wird nun die aus der Ontologie abgeleitete attributierte kontextfreie Grammatik umrissen. *Attributierte Grammatiken* (AG) sind nach KNUTH (1968) de-

finiert als Tupel der Form

$$AG = (N, \Sigma, P, R, A, S) \quad (1)$$

Hierbei repräsentiert N die Menge der Nichtterminale und die Menge Σ der Terminale. $N \cup \Sigma$ ist die Gesamtmenge aller Symbole der Grammatik. Nichtterminale stehen hierbei für Symbole, welche im Gegensatz zu Terminalen durch Produktionsregeln ersetzt werden können. P steht für die Menge der Produktionsregeln der Form

$$N \rightarrow (\Sigma \cup N)^* \quad (2)$$

wobei $*$, der *Kleene-Sternoperator*, für eine beliebige Aneinanderreihung der Elemente aus $N \cup \Sigma$ steht. Bei einer Regelanwendung wird ein Nichtterminal durch die rechte Seite der Regel ersetzt. R ist die Menge der semantischen Regeln, A die der Attribute und S ist die der Startsymbole, einer Teilmenge der Nichtterminale. Mit ihnen kann eine generative Ableitung von Worten der Grammatik begonnen werden. Die Menge der Symbole umfasst z. B. zwei Gebäudesymbole $\{B, b\}$, zwei Vollgeschossymbole $\{V, v\}$, jeweils zwei Symbole für Pult-, Sattel- und Walmdachgeschoss $\{PD, pd, SD, sd, WD, wd\}$, sowie zwei Symbole für eine Mischform, die halb Sattel- und halb Walmdachgeschoss ist $\{SWD, swd\}$. Alle aufgezählten Symbole sind sowohl in der Menge der Nichtterminale (Symbolbenennungen in Großbuchstaben) und der Terminale (Symbolbenennungen in Kleinbuchstaben) vertreten. Die Menge der Startsymbole umfasst das Nichtterminalsymbol $\{B\}$ für Gebäude.

Begonnen wird die Produktion mit der einfachsten Form eines Gebäudekörpers, einem Quader, welcher stellvertretend für ein einfaches Flachdachgebäude steht. In der ersten Produktionsphase wird eine Hypothese weiterverfolgt, wenn diese als Teil des zu rekonstruierenden Gebäudes identifiziert werden kann. Diese Weiterentwicklung erfolgt durch das sukzessive Anfügen weiterer Flachdachgebäude an die vorhergehende akzeptierte Modellhypothese. Alle sich ergebenden Modellhypothesen entsprechen in diesem Stadium der Produktion des in *CityGML* (GRÖGER et al. 2005), einem

Format zur Repräsentation von 3D-Stadtmodellen definierten *Detaillierungsgrads 1* (*Level of Detail 1, LoD1*). Die in diesem Schritt erzeugten Teile der Flachdachgebäude lassen sich in der zweiten Produktionsphase, wenn die Flachdachhypothese nicht zutrifft, durch die Anwendung von Produktionsregeln jeweils durch Hypothesen für Teilgebäude mit anderem Dachtyp (z. B. Satteldach) ersetzen, wobei die bereits erfolgte Zugordnung von Wandgeometrien beibehalten wird. Gleichzeitig erfolgt die Anpassung des Constraint-Graphen durch die Produktionsregel. Dieses Vorgehen ähnlich der von (BRENNER 2000) vorgeschlagenen Zerlegung des Grundrisses in Rechtecke zum Finden von Anknüpfungspunkte für Dachhypothesen.

3 Generierung von Gebäudemodellen

Als nächster Schritt hin zur Erzeugung von Hypothesen für komplexe Gebäudemodelle wird zunächst eine Grammatik zur Erzeugung solcher Modelle vorgestellt. Dies ermöglicht eine weitere Nutzung gewonnenen Wissens und einen ersten Eindruck von den mit der Grammatik beschreibbaren Gebäudemodellen. Für die Erzeugung typischer Gebäudemodelle werden die Geometrien der Grammatiksymbole durch Primitive der *Constructive Solid Geometry – CSG* (MÄNTYLÄ 1988) repräsentiert und ihre freien Parameter mit typischen Maßen und Maßbereichen aus der Ontologie belegt. Darüber hinaus sind Wahrscheinlichkeiten aus Vorwissen abzuleiten. Der Produktionsprozess wird dann nicht mehr durch die Verfahren der Modellselektion bestimmt, sondern durch ein probabilistisches Entscheidungsverfahren z. B. auf Basis einer Gaußverteilung. In diesem Fall lassen sich die Produktionsregeln vereinfachen, da die Fortschreibung des Constraint-Graphen nicht explizit betrachtet werden muss. Die Grammatik hat die folgenden Produktionsregeln:

$$1. \text{ Änderungsproduktion} \\ P_1 : B \rightarrow B \quad (3)$$

$$2. \text{ Rotationsproduktionen} \\ P_{2\dots 5} : B \xrightarrow{0\dots 3} B \quad (4)$$

$$3. \text{ Skalierungs- und Instanziierungsproduktion} \\ P_6 : B \rightarrow k, B \quad (5)$$

$$4. \text{ Terminierungsproduktion} \\ P_7 : B \rightarrow \varepsilon \quad (6)$$

$$5. \text{ Teilungsproduktion} \\ P_8 : B \rightarrow [B]^n \quad (7)$$

Neben den Produktionsregeln enthält die attributierte Grammatik auch semantische Regeln, die Attributwerte zwischen den Symbolen einer Produktionsregel übertragen. Da sowohl die Verortung der CSG-Primitive in Form einer Transformationsmatrix T als auch deren Größe durch die Attribute der Symbole bestimmt wird, sind alle bei den Produktionen stattfindenden geometrischen Operationen Teil der semantischen Regeln der jeweiligen Produktionsregel. Im Rahmen der Produktionsregel P_1 wird ein Körper erzeugt und im Raum positioniert. Im Fall der Generierung handelt es sich um ein „typisches“ Geschoss mit dem Ankerpunkt im Ursprung.

Die vier Produktionsregeln (P_3 bis P_6) unterscheiden sich durch den Rotationsursprung, der durch den Index $i \in \{0, 1, 2, 3\}$, der über dem Produktionspfeil notiert ist, angegeben wird. Dies ist in Abb. 1 dargestellt. Bei Anwendung einer solchen Regel wird zuerst das Rotationszentrum auf eine der vier unteren Eckpunkte des Quaders ver-

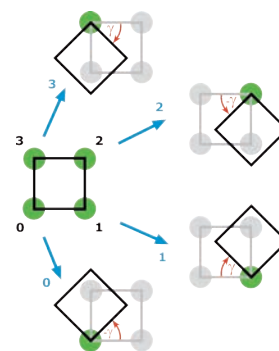


Abb. 1: Graphische Darstellung der Rotationsproduktionen P_2 bis P_5 .

lagert (Transformationsmatrix T_i) und dann eine Rotation γ zwischen 0° und 90° (Rotationsmatrix R_γ) zuzüglich einer Basisrotation (Rotationsmatrix R_i) abhängig von der jeweiligen Ecke ausgeführt. T_V ist ein Attribut des linken Nichtterminalsymbols B und T_R vom rechten B . Anwendungen der Regeln sind in Abb. 1 gezeigt; T_R wird dabei durch die folgende semantische Regel berechnet:

$$T_R = T_V \cdot R_\gamma \cdot R_i \cdot T_i \quad (6)$$

Alle nicht explizit aufgeführten semantischen Regeln übertragen die Attributwerte des Symbols auf der linken Seite direkt auf die entsprechenden Attribute der produzierten Symbole.

Eine besondere Art der Produktionsregeln, die erstmals bei (MÜLLER et al. 2006) verwendete Teilungsproduktionsregel (P_8), dient der Aufteilung eines virtuellen Körpers entlang der Längsachse in n gleichlange virtuelle Körper gleicher Dimension. Dieses Vorgehen entspricht semantisch der Aufteilung eines Gebäudes in mehrere Teile auf Basis von Vorwissen. Diese Art der Produktionsregeln wird auch bei der Erzeugung von Gebäuden mit differenzierten Geschossen eine wichtige Rolle spielen, da für diese typische Geschosshöhen vorliegen.

Neben den semantischen Regeln sind die Produktionsregeln auch mit Constraints versehen, die erfüllt sein müssen, damit eine Produktionsregel ausgeführt wird. Die

Constraints lassen sich aus der eingangs erwähnten Ontologie für Gebäude ableiten und werden hier nicht explizit wiedergegeben.

Ein Beispiel für die Anwendung der Regeln ist anhand eines Ableitungsbaums in Abb. 2a) gezeigt. Angewendet wurden nacheinander die Regeln P_6 , P_8 , P_5 , P_6 , P_8 , ... Das Ergebnis der Regelnanwendungen ist im Sinne der *constructive solid geometry* (CSG) (MÄNTYLÄ 1988) als CSG-Baum zu interpretieren. Jeder innere Knoten steht für eine Vereinigungsoperation. Die entsprechende Randflächendarstellung (*boundary representation*) kann daraus mit Standardverfahren aus dem Bereich *computer aided design* (CAD) abgeleitet werden.

4 Ausblick

Mit der Grammatik steht ein Verfahren zur Verfügung, welches an den Rekonstruktionsprozess angepasst arbeitet. Diese Anpassung ergibt sich aus dem Aufbau des Gesamtmodells aus Modellteilen und zugehörigen Aggregationsmechanismen. Somit ist es möglich, die Daten sequentiell zu erkunden und zu erklären. Durch die Einbringung von Modellwissen ist es dennoch möglich, fehlerhafte Daten zu korrigieren und Lücken in den Daten zu schließen. Durch die Einführung der Rotationsproduktionen ist es gelungen, eine hohe Variabilität der Grundrisse zu erreichen und insbesondere

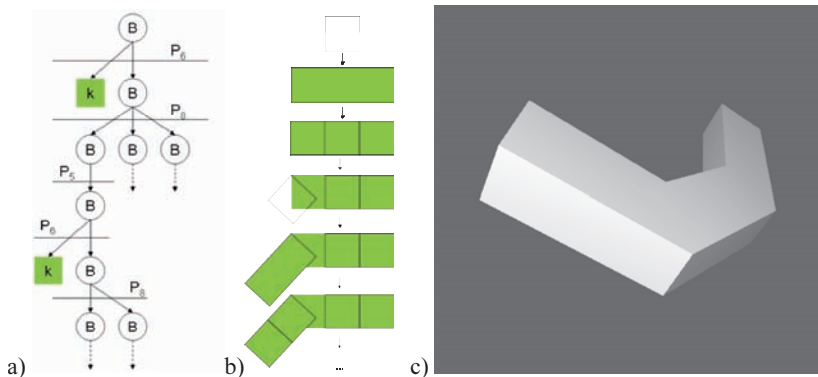


Abb. 2: (a) Auszug des Ableitungsbaums der Grammatik und eine Visualisierung seiner Geometrie (b) für ein Gebäudemodell (c).

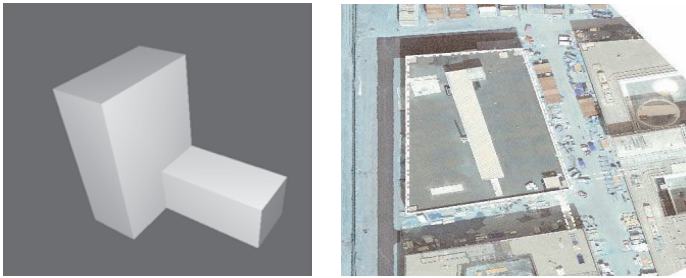


Abb. 3: Eine generierte Gebäudehypothese mit unterschiedlich vielen Stockwerken (links) und ein Gebäudegrundriss mit Eckwinkeln von weniger als 90° (rechts).

das Rekonstruktionsmodell für das in Abb. 2 präsentierte Beispiel mit Hilfe der Grammatik zu erzeugen.

Wie im Abschnitt 2 angedeutet, kann die Grammatik kanonisch erweitert werden, um auch Gebäude mit mehr als einem Geschoss zu erzeugen. Gleiches gilt für die Generierung von Gebäuden mit Gebäudeteilen unterschiedlicher Geschossanzahlen. Ein Beispiel zeigt Abb. 3 links.

Es zeigte sich aber, dass die volle Variabilität im Grundriss aufgrund der gewählten geometrischen Primitivkörper noch nicht in Gänze erreicht ist. So stellen insbesondere Gebäude mit sehr spitzen Ecken, wie in Abb. 3 rechts gezeigt, ein Problem dar, da die Vereinigung von Quadern nur Winkel von mindestens 90° ermöglicht. Diesem Problem kann begegnet werden, indem die in den Primitiven enthaltenen Restriktionen explizit gemacht und somit teilweise deaktiviert oder aufgeweicht werden können. Ein Vorschlag für eine solche Modellierung findet sich in (BRENNER 2004); es muss untersucht werden, wie dieser Ansatz in den hier vorgestellten integriert werden kann.

Neben der Aufweichung und Deaktivierung der Constraints sind Erweiterungen der vorgestellten Grammatik in Richtung detailreicherer Modelle erforderlich. Im ersten Schritt muss die Generierung von Dächern ermöglicht werden. Die bislang generierten Modelle sind ausnahmslos Flachdachgebäude und somit nicht geeignet für die Rekonstruktion von typischen Gebäuden unserer Breiten. Hierfür ist es notwendig, auch die Dachlandschaften mit all ihren komplexen Teilstrukturen in die Modelle zu

integrieren. Ziel wird es daher sein, die durch den Generierungsprozess entstehende Aufteilung des Grundrisses zu nutzen, um die Dachstruktur der Gebäude abzuleiten bzw. diese zu produzieren. Der nächste Schritt ist die Rekonstruktion der Detailstruktur der Dächer in Form der Dachöffnungen wie Dachgauben, Dachfenster oder Dachbalkonen.

Weiter wird zu untersuchen sein, ob die Kombination des hier vorgestellten Ansatzes mit den in der Einleitung angesprochen Verfahren zur Rekonstruktion der Fassadestrukturen möglich ist, um ein hoch detailliertes Gesamtmodell für Gebäude zukünftig für die schrittweise Rekonstruktion zur Verfügung stellen zu können.

Danksagung

Besonderer Dank gilt Viktor Stroh, Martin Krückhans und Jan Behmann für Diskussionen und Unterstützung bei der Umsetzung der Konzepte. Diese Arbeit entstand im Kontext des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Bündelprojektes „Abstraktion von Geoinformation bei der multiskaligen Erfassung, Verwaltung, Analyse und Visualisierung“ (FO 180/10-1).

Literatur

ABMAYR, T., HÄRTL, F., METTENLEITER, M., HEINZ, I., HILDEBRAND, A., NEUMANN, B. & FRÖHLICH, C., 2004: Realistic 3d-reconstruction – combining laserscan data with rgb-color-information. – International Archives of Pho-

- togrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **35**: 198–203.
- AKAIKE, H., 1974: A new look at the statistical model identification. – IEEE Transactions on Automatic Control **19** (6): 716–723.
- BORNAZ, L., LINGUA, A. & RINAUDO, F., 2003: Multiple scan registration in lidar close range applications. – International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **34** (6).
- BRENNER, C., 2000: Dreidimensionale Gebäude-rekonstruktion aus digitalen Oberflächenmodellen und Grundrissen. – Dissertation, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Stuttgart.
- BRENNER, C., 2004: Modelling 3d objects using weak csg primitives. – International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **35** (3): 1085–1090.
- CHOMSKY, N., 1959: On certain formal properties of grammars. – Information and Control **2**: 137–167.
- DUARTE, J., 2002: Malagueira Grammar – towards a tool for customizing Alvaro Siza's mass house at Malagueira. – PhD thesis, MIT School of Architecture and Planning.
- FISCHLER, M.A. & BOLLES, R. C., 1981: Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. – Communications of the ACM **24** (6): 381–395.
- GRÖGER, G., BENNER, J., DÖRSCHLAG, D., DREES, R., GRUBER, U., LEINEMANN, K. & LÖWNER, M.-O., 2005: Das interoperable 3D-Stadtmodell der SIG 3D – Zeitschrift für Vermessungswesen **130** (6): 343–353.
- KAHLESZ, F., LILGE, C. & KLEIN, R., 2007: Easy-to-use calibration of multiple-camera setups. – Workshop on Camera Calibration Methods for Computer Vision Systems (CCMVS2007).
- KNUTH, D.E., 1968: Semantics of context-free languages. – Theory of Computing Systems **2** (2): 127–145.
- MIERSWA, I., WURST, M., KLINKENBERG, R., SCHOLZ, M. & EULER, T., 2006: Yale: Rapid prototyping for complex data mining tasks. Proceedings of the 12th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining.
- MÜLLER, P., WONKA, P., HAEGLER, S., ULMER, A. & VAN GOOL, L., 2006: Procedural modeling of buildings. – Proceedings of ACM SIGGRAPH 2006 / ACM Transactions on Graphics (TOG), ACM Press **25** (3): 614–623.
- MÜLLER, P., ZENG, G., WONKA, P. & VAN GOOL, L., 2007: Image-based Procedural Modeling of Facades. – Proceedings of ACM SIGGRAPH 2007 / ACM Transactions on Graphics **26** (3).
- MÄNTYLÄ, M., 1988: Introduction to Solid Modeling. – W.H. Freeman & Co., New York, NY.
- RIPPERDA, N. & BRENNER, C., 2007: Data driven rule proposal for grammar based facade reconstruction. – International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **36** (3/W49A): 1–6.
- STEINHAGE, V., 1998: Zur automatischen Gebäuderekonstruktion aus Luftbildern. – Habilitation, Faculty of Mathematics and Natural Science of the University of Bonn.
- STINY, G., 1982: Spatial relations and grammars. – Environment and Planning B **9**: 313–314.
- WONKA, P., WIMMER, M., SILLION, F. & RIBARSKY, W., 2003: Instant architecture. – ACM Transactions on Graphics **22**: 669–677.

Anschrift der Autoren:

Dipl.-Ing. DIRK DÖRSCHLAG, PD Dr. GERHARD GRÖGER, Prof. Dr. LUTZ PLÜMER, Rheinische Friedrich Wilhelm Universität Bonn, Institut für Geodäsie und Geoinformation, D-53115 Bonn, Tel.: +49-228-73-3035 (Dörschlag), 1764 (Gröger), 1750 (Plümer), Fax: +49-228-73-1753, e-mail: doerschlag | groeger | pluemer@uni-bonn.de

Manuskript eingereicht: Dezember 2007
Angenommen: März 2008