

# Gebäuderekonstruktion durch Anwendung automatisch abgeleiteter Regeln

Susanne Becker  
Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart  
Geschwister-Scholl-Straße 24D  
70174 Stuttgart  
susanne.becker@ifp.uni-stuttgart.de

## 1 Einleitung

Entwicklungen auf dem Gebiet der Erfassung, Visualisierung und Interpretation von 3D-Geodaten schreiten seit einigen Jahren immer schneller voran. Neue Systeme und Algorithmen vereinfachen die Handhabung großer und komplexer Datenmengen. Über digitale Globen wie Google Earth oder Microsoft Bing Maps dringen 3D-Geodaten zudem mit wachsender Selbstverständlichkeit in unser tägliches Leben ein. Sie ermöglichen das virtuelle Erkunden städtischer Umgebungen, wobei sich hier 3D-Stadtmodelle als äußerst hilfreich erweisen.

Überwiegend aus luftgestützt erfassten Daten erzeugt, zeigen die 3D-Gebäuderepräsentationen existierender Stadtmodelle in der Regel differenzierte Dachformen; Fassaden werden jedoch durch ebene unstrukturierte Flächen dargestellt, oftmals texturiert durch Fassadenfotos. Während solche 2D-Fassadentexturen zwar zusätzliche Informationen über das Erscheinungsbild der Fassade bereitstellen, handelt es sich dabei dennoch lediglich um eine Menge uninterpretierter Grauwerte, die der Intelligenz des Beobachters bedürfen, um verstanden zu werden. Gerade die Interpretation von Fassaden - insbesondere die Kenntnis von Position und Größe funktionaler Fassadenelemente wie Fenster und Türen - ist jedoch für aktuelle und zukünftige Anwendungen von großer Bedeutung. Dazu zählen neue Entwicklungen in den Bereichen Computergraphik, virtuelle Realität und 3D-Stadtplanung ebenso wie energetische Simulationen an Gebäudefassaden, die Finite Elemente Analyse im Bauingenieurwesen oder Planungen auf der Grundlage sogenannter BIM (Building Information Modeling) - Modelle, um nur einige zu nennen. Sie alle benötigen detaillierte

Gebäuderepräsentationen, in denen Fassadenstrukturen als explizite 3D-Geometrien in Form von Einbuchtungen oder Vorsprüngen modelliert sind. Interpretierte Fassadenmodelle sind nicht zuletzt ein wertvoller Beitrag zu intelligenten Umgebungen, in denen räumliche Objekte basierend auf geometrischen, topologischen oder semantischen Eigenschaften vielfach miteinander vernetzt sind. Virtuelle Umgebungen wie diese bilden den Rahmen für die Modellierung und Simulation komplexer Prozesse und Arbeitsabläufe, die von zahlreichen Objektabhängigkeiten sowie von Entscheidungen und Interaktionen des Nutzers beeinflusst werden.

Um Fassadenelemente wie Fenster und Türen zu rekonstruieren, werden häufig terrestrisch erfasste LiDAR- und Bilddaten eingesetzt. Für eine effektive Aufnahme in Straßenszenen eignen sich hierfür insbesondere fahrzeuggestützte Erfassungssysteme, die üblicherweise mehrere Laserscanner und/oder Bildsensoren zu einem integrierten Aufnahmesystem kombinieren (Kutterer, 2010). Existierende Systeme liefern bereits dichte Punktwolken in ausreichender Qualität. Neben großen Fortschritten in der Sensortechnologie erweitern neue Bild-Matching-Algorithmen die Möglichkeiten der Generierung dichter 3D-Punktwolken wesentlich. So zeigen zum Beispiel Rothermel und Haala (2011) das große Potenzial von Semi-Global Matching – Methoden für die automatische Ableitung von digitalen Oberflächenmodellen aus Luftbildern.

Trotz einer kontinuierlichen Verbesserung der Datenqualität bezüglich Genauigkeit und Dichte der 3D-Punktwolken verbleibt dennoch das Problem partieller Verdeckungen, die speziell im terrestrischen Fall zu großen Beeinträchtigungen führen können. So lassen sich zum Beispiel bei der fahrzeuggestützten Datenerfassung, bei der die mobile Sensorplattform gezwungen ist, dem Straßenverlauf zu folgen, ungünstige Blickwinkel oder Sichthindernisse wie parkende Autos, Büsche und Bäume kaum vermeiden. Die Folge sind 3D-Punktwolken, die die Fassadenoberflächen oftmals nur unvollständig abdecken; die Extraktion von Fassadenstrukturen in konstant guter Qualität ist nicht mehr gewährleistet.

Um auch in Bereichen mit schlechten und lückenhaften Sensordaten realistische Fassadenstrukturen erzeugen zu können, müssen entsprechende Rekonstruktionsverfahren robust sein und mit unterschiedlichen Datenqualitäten zurechtkommen. Realisiert wird dies hier durch die Kombination datengetriebener und wissensbasierter Ansätze, deren beider Vorteile genutzt werden. Datengetriebene Methoden zeigen sich flexibel bezüglich der Erfassung verschiedener Formen von Fassadenelementen; die Qualität des resultierenden Fassadenmodells

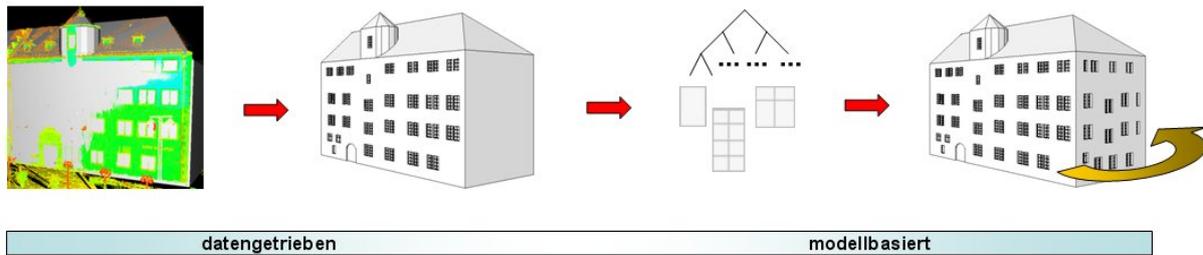
ist allerdings wesentlich von der Genauigkeit, Dichte und Verfügbarkeit der Sensordaten abhängig. Durch die Integration von a priori Wissen über geometrische und topologische Eigenschaften des zu rekonstruierenden Objekts sind modellbasierte Ansätze in dieser Hinsicht weitaus weniger fehleranfällig. Sie ermöglichen eine robuste Modellierung und garantieren die topologische Korrektheit des Rekonstruktionsergebnisses. Prozedurale Techniken auf der Grundlage einer Grammatik haben den zusätzlichen Vorteil, Gebäudestrukturen auch für ausgedehnte Gebiete effizient generieren zu können (Müller et al., 2006b).

Der Ablauf des hier entwickelten Verfahrens wird in Kapitel 2 skizziert. Kapitel 3 zeigt Anwendungen und Ergebnisse. In Kapitel 4 folgen schließlich eine Zusammenfassung und ein Ausblick auf zukünftige Arbeiten.

## **2 Ableitung von Strukturinformation für eine regelbasierte 3D-Fassadenrekonstruktion**

Ziel der Fassadenrekonstruktion ist es, 3D-Gebäudemodelle mit explizit modellierter Fassadengeometrie bereitzustellen. Im hier vorgestellten Verfahren geschieht dies durch die geometrische und semantische Verfeinerung bestehender grober Gebäudemodelle (Haala et al., 2006; Becker und Haala, 2008). Fassadenstrukturen werden integriert, indem die ebenen Fassadenflächen durch Einbuchtungen oder hervorstehende Elemente aufgebrochen werden. Im Fokus steht die Rekonstruktion solcher Strukturen, die einerseits das Erscheinungsbild der Fassade beeinflussen und andererseits für Anwendungen wichtig sind, die nicht nur die Geometrie, sondern auch die Semantik der modellierten Fassadenelemente benötigen. Dies sind semantisch bedeutsame Einheiten wie Fenster und Türen, Balkone, Erker oder andere Vorbauten, die beispielsweise für architektonische Planungen (Fenster, Türen, Vorbauten), energetische Abschätzungen (Fenster, Türen) oder für die Fußgängernavigation (Türen) von Bedeutung sind. Fassadenelemente, die der reinen Verzierung dienen wie etwa reliefartige Fensterverdachungen oder Gesimse, bleiben unberücksichtigt. Die Fassadenrekonstruktion konzentriert sich damit auf rein funktionale Strukturen der Gebäudeaußenhülle.

Abbildung 1 veranschaulicht die wesentlichen Stufen der entwickelten Fassadenrekonstruktion. Das Verfahren beginnt mit der Extraktion und Modellierung von Fassadenstrukturen aus 3D-LiDAR-Punktwolken (Abbildung 1, Stufe 1).



*Abb. 1: Ablauf der Fassadenrekonstruktion*

Das Resultat ist ein Fassadenmodell mit geometrisch und semantisch interpretierten Fassadeneinbuchtungen und -vorsprüngen (Abbildung 1, Stufe 2). Aufgrund der erwähnten Abhängigkeit entsprechender Ansätze von der Qualität der Sensordaten ist diese Vorgehensweise auf Fassadenbereiche beschränkt, in denen dichte 3D-Punktwolken verfügbar sind. Hier kommt nun eine wissensbasierte Komponente ins Spiel: Durch die Anwendung einer Grammatik sollen all diejenigen Fassadenregionen vervollständigt werden, für die entweder keine oder qualitativ ungenügende Beobachtungen vorliegen. Damit die in diesen Bereichen hinzugefügten Fassadenstrukturen realistisch sind, muss die Grammatik speziell auf den Stil des Gebäudes zugeschnitten sein. Generell ist der Aufbau einer Grammatik insbesondere durch die Definition der Regeln mit einem hohen manuellen Aufwand verbunden (Müller et al., 2006a). Jeder Gebäudestil benötigt zudem eine eigene Grammatik. Die Herausforderung besteht darin, dennoch eine effiziente Modellierung zu erreichen. Kern der Arbeit ist daher ein Verfahren, mit dem für beliebige Gebäude vollautomatisch individuelle Fassadengrammatiken erzeugt werden können. Dazu gehört beispielsweise, charakteristische geometrische und topologische Fassadenmerkmale automatisch zu erkennen und in Regeln zu überführen (Abbildung 1, Stufe 3). Die aus der datengetriebenen Rekonstruktion verfügbaren Fassadenstrukturen dienen hierbei als Wissensbasis. Sie enthalten all die Informationen, die für die Modellierung von Fassaden im Stil des betreffenden Gebäudes notwendig sind. Entsprechend repräsentieren die daraus abgeleiteten Fassadengrammatiken Wissen über gebäudetypische Fassadenstrukturen. Durch ihre Anwendung soll es möglich werden, selbst dann noch realistische Fassadenstrukturen zu erzeugen, wenn die verfügbaren Sensordaten für eine datengetriebene Rekonstruktion nicht ausreichen würden (Abbildung 1, Stufe 4).

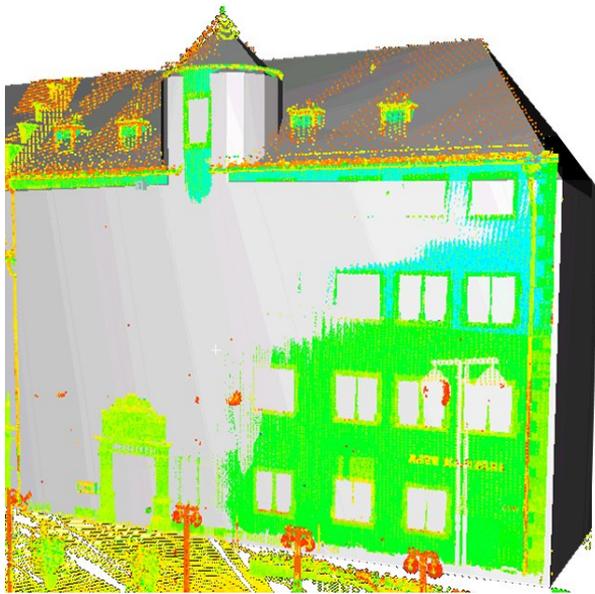
Die folgenden Abschnitte geben einen kurzen Überblick über die Schritte, die zur Strukturerkennung notwendig sind. Abschnitt 2.1 befasst sich dabei mit der datengetriebenen Detektion von Fassadenelementen aus 3D-LiDAR-

Punktwolken, also mit dem Aufbau der Wissensbasis. Auf der Grundlage dieser Wissensbasis lassen sich, wie in Abschnitt 2.2 gezeigt werden wird, übergeordnete hierarchische Strukturen extrahieren, die einen wesentlichen Teil der abzuleitenden Fassadengrammatik ausmachen. Ausführliche Beschreibungen sowie zahlreiche Anwendungsbeispiele sind in Becker (2011) zu finden.

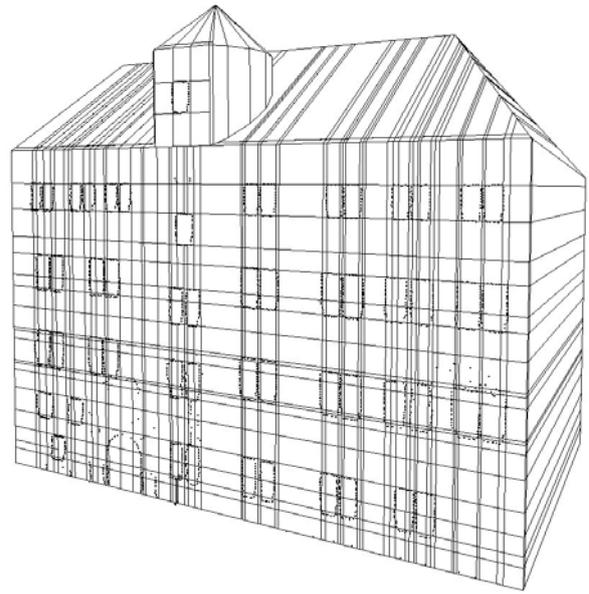
## **2.1 Erkennung und Rekonstruktion funktionaler Fassadenelemente**

Die datengetriebene Rekonstruktion funktionaler Fassadenelemente basiert auf der Zellenzerlegung, einem Prinzip, das sich effizient für die Modellierung topologisch korrekter 3D-Gebäudemodelle einsetzen lässt. Demonstriert wurde dies bereits für die Gebäudegeneralisierung durch Kada (2006). Die Zellenzerlegung lässt sich jedoch auch für den umgekehrten Fall, nämlich die Verfeinerung der Gebäudegeometrie, erfolgreich anwenden. Ein gegebenes grobes Gebäudemodell wird dabei so in 3D-Zellen unterteilt, dass diese entweder reine Wandbereiche oder Fensterregionen darstellen und damit eine eindeutige Semantik aufweisen. Die hierzu notwendige Strukturinformation wird aus terrestrisch erfassten LiDAR-Punktwolken abgeleitet. Unter Ausnutzung der Komplementarität von LiDAR- und Bilddaten können optional Fassadenbilder in die Rekonstruktion einbezogen werden, um den Detailgrad der modellierten Fassadenelemente weiter zu erhöhen.

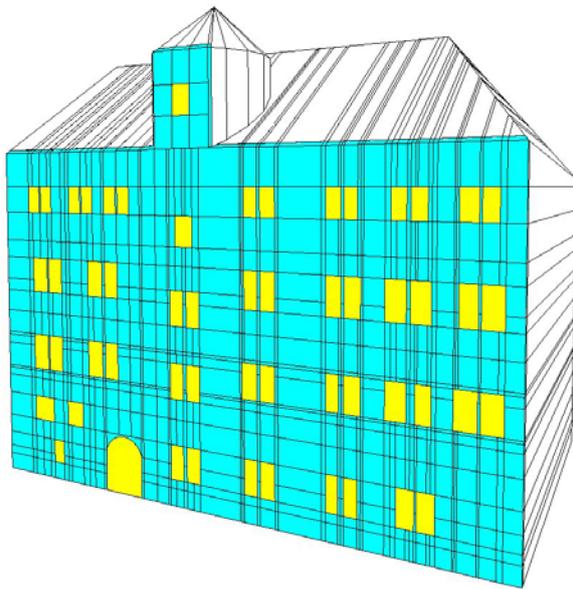
Der Gesamtprozess der Fassadenrekonstruktion ist exemplarisch in Abbildung 2 veranschaulicht. Aus der Menge der LiDAR-Punkte (Abbildung 2a) werden in einem ersten Schritt diejenigen Punkte extrahiert, die an den Begrenzungen von Fenstern und Türen gemessen wurden. Auf Basis der gefundenen Kantenpunkte werden anschließend horizontale und vertikale Kantenlinien abgeleitet (Abbildung 2b). Sie definieren Teilungsebenen, die jeweils senkrecht auf der Fassade stehen. Die eigentliche Zellenzerlegung erfolgt, indem das grobe Gebäudemodell entlang der gefundenen Teilungsebenen geschnitten wird. Die so generierten 3D-Zellen werden auf Basis der beobachteten LiDAR-Punkte in Wand- und Fensterzellen klassifiziert (Abbildung 2c). Um aus der Ansammlung von Wand- und Fensterzellen ein explizites 3D-Fassadenmodell zu erhalten, werden alle Fensterzellen entfernt und die verbleibenden Wandzellen verschmolzen (Abbildung 2d).



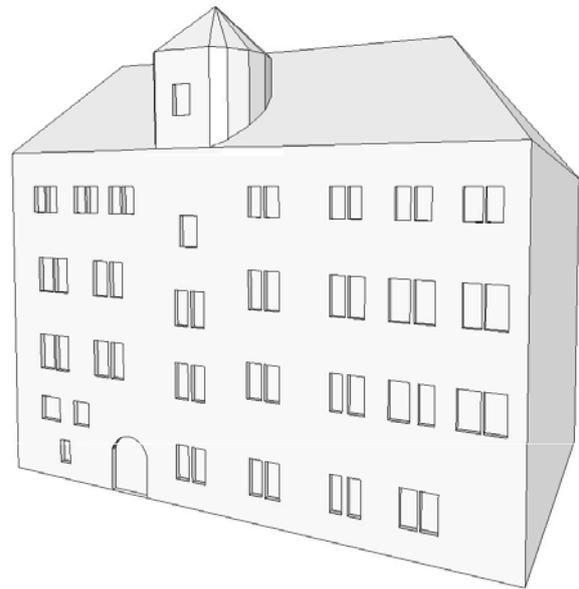
(a)



(b)



(c)



(d)

Abb. 2: Datengetriebene Rekonstruktion des Beispiels „Alte Kanzlei, Stuttgart“

## 2.2 Erkennung übergeordneter hierarchischer Strukturen

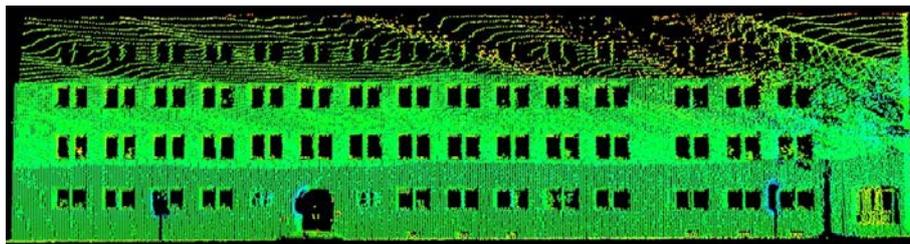
Das Ergebnis der datengetriebenen Rekonstruktion von Fenstern und Türen aus 3D-LiDAR-Punktwolken enthält implizit Modellwissen, das sich im Wesentlichen aus geometrischen, semantischen und topologischen Eigenschaften der Fassadenstrukturen ableitet. Um dieses Wissen für weitere Modellierungsaufgaben nutzen zu können, muss die rekonstruierte Gebäudefront zunächst in elementare Fassadeneinheiten segmentiert werden, um anschließend strukturelle Beziehungen festzustellen, die zwischen diesen gelten. Die Bestimmung grundlegender Fassadeneinheiten basiert auf einem Plane-Sweep-Verfahren, das die Fassade in einem ersten Schritt in Stockwerke unterteilt. Nachfolgende Teilungsoperationen entlang der vertikalen Begrenzungen von Fenstern und Türen innerhalb eines jeden Stockwerks führen schließlich auf Regionen, die entweder einen homogenen Wandbereich beschreiben oder ein Geometrieobjekt wie ein Fenster oder eine Tür beinhalten. Sie werden entsprechend als Wand- und Geometrikacheln bezeichnet. Jedem Typ einer Wandkachel und einer Geometrikachel wird zudem zur Unterscheidung ein eigenes Symbol zugewiesen.

Nachdem mit den Kacheln die Grundelemente der Fassadengrammatik, die Terminale, ermittelt sind, sollen diese nun in einem übergeordneten Zusammenhang betrachtet werden, indem sie auf Beziehungen untereinander untersucht werden. Von Bedeutung sind mehrfach auftretende Gruppierungen und hierarchische Strukturen, die Verbindungen zwischen den Terminalen identifizieren. Die Detektion von Strukturen geschieht auf der Basis einer Folge diskreter Symbole. Der hierfür entwickelte Algorithmus arbeitet vollautomatisch. Er ist darauf ausgelegt, Sequenzen diskreter Symbole zu komprimieren. Redundante Teilfolgen werden erkannt und jeweils durch ein einzelnes Zeichen ersetzt. Die Detektion sich wiederholender Zeichenfolgen erfolgt stufenweise und offenbart dadurch hierarchische Beziehungen der Symbole untereinander, die in Form von Ersetzungsregeln festgehalten werden. Der Algorithmus liefert damit Informationen über den strukturellen Aufbau der Terminal-Sequenz und interpretiert die geometrische Anordnung der zugehörigen Kacheln auf der Fassade. Enthalten sind darin neben solchen Beziehungen, die innerhalb eines Stockwerks gelten, auch potentielle Interaktionen der Stockwerke. Dies ist möglich, da die Kachelsequenzen der einzelnen Stockwerke bei der Strukturanalyse nicht isoliert, sondern gemeinsam betrachtet werden. Abbildung 3 veranschaulicht die stufenweise ablaufende Strukturerkennung am Beispiel des Datensatzes „Prinzenbau, Stuttgart“. Aus Gründen einer einfacheren Darstellung beschränkt sich das Beispiel auf ein einzelnes, für das Gebäude repräsentatives Stockwerk. Die

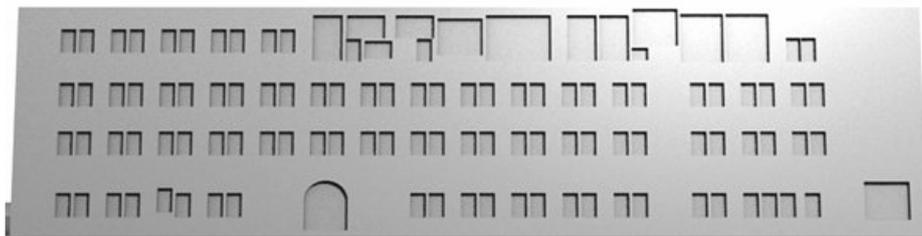


### 3 Anwendung der Regelsysteme

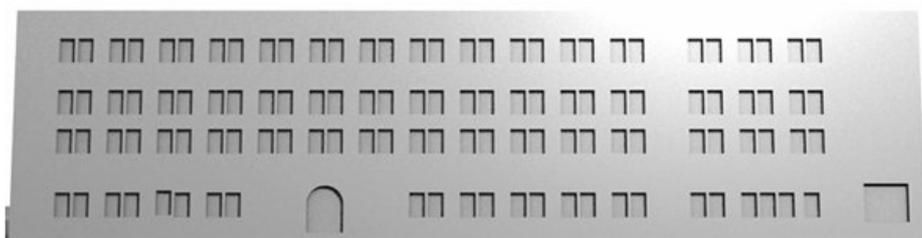
Eine automatisch abgeleitete individuelle Fassadengrammatik - bestehend aus Regelsystem und elementaren Fassadeneinheiten - enthält Wissen über die architektonische Gestaltung der beobachteten Gebäudefassade. Eine solche Grammatik macht es möglich, für bereits existierende grobe Gebäudemodelle Hypothesen für mögliche Fassadenstrukturen zu generieren. Innerhalb eines Produktionsprozesses werden neue Terminalsequenzen erzeugt. Ausgangspunkt ist eine beliebige Fassade, repräsentiert durch ein Startsymbol, das sogenannte Axiom. Durch die Anwendung einer passenden Regel auf das Axiom wird dieses durch andere Symbole ersetzt, die wiederum durch nachfolgend ausgeführte Regeln substituiert werden können. Die auf diese Weise entstehende Zeichenkette lässt sich direkt in eine Sequenz aus expliziten 3D-Fassadenstrukturen übersetzen und stellt somit die formale Beschreibung einer neuen Fassadenkonfiguration dar.



(a) LiDAR-Punktwolke



(b) 3D-Fassadenmodell nach datengetriebener Rekonstruktion



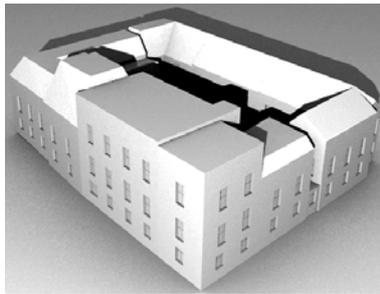
(c) 3D-Fassadenmodell nach grammatikbasierter Vervollständigung

*Abb. 4: Verbesserungspotenzial grammatikbasierter Modellierung am Beispiel eines Bürogebäudes in Stuttgart*

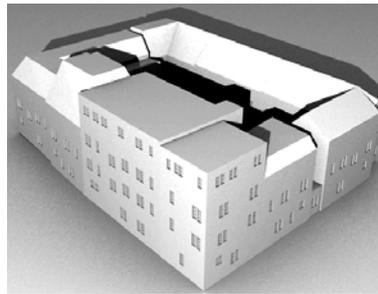
Abbildung 4a zeigt eine 3D-Punktcloud, aufgenommen durch das fahrzeuggestützte Laserscanning-System StreetMapper. Hervorgerufen durch Sichthindernisse sowie durch schräge Blickwinkel zu oberen Gebäudeteilen ist der Punktabstand auf der Fassade großen Schwankungen unterworfen. In Fassadenbereichen, in denen keine oder nur wenige 3D-Punkte vorhanden sind, ist eine genaue und robuste Bestimmung von Fensterobjekten nicht mehr möglich; das Ergebnis der datengetriebenen Rekonstruktion wird fehlerhaft (Abbildung 4b). Mit Hilfe einer grammatikbasierten Vervollständigung lassen sich jedoch selbst in Regionen mit ungenügender Punktabdeckung sinnvolle Fassadenstrukturen erzeugen. Die Grundidee besteht dabei darin, die Ableitung der Fassadengrammatik auf diejenigen Gebäudebereiche zu beschränken, in denen dichte 3D-Punkte und somit korrekt rekonstruierte Fassadenstrukturen verfügbar sind. Ausdehnung und Lage einer solchen Region kann durch die Auswertung lokaler Punktabstände bestimmt werden. Im gegebenen Beispiel erstreckt sich das für die Grammatikableitung geeignete Gebiet über die unteren drei Stockwerke. Hier werden charakteristische Fensterelemente und -anordnungen detektiert und in eine individuelle Fassadengrammatik überführt. Nach Elimination bereits existierender Fassadenstrukturen im oberen Stockwerk können dort mit dieser Grammatik realistische und zum Stil des Gebäudes passende Fensterobjekte generiert werden (Abbildung 4c). Die Grammatik kann somit genutzt werden, um auch in Punktclouds mit teilweise geringer Punktdichte robust qualitativ gute Rekonstruktionsergebnisse zu erzielen. Dabei ist es nicht nur möglich, wie im gezeigten Beispiel einzelne Fassaden zu vervollständigen; auch für seitliche und rückwärtige Fassaden eines Gebäudes lassen sich auf diese Weise unabhängig von der Verfügbarkeit von Sensordaten synthetische Fassadenstrukturen erzeugen. Das Konzept individueller, direkt am betreffenden Gebäude abgeleiteter Fassadengrammatiken garantiert, dass der jeweilige Architekturstil beibehalten wird.

Ein Kriterium für die Flexibilität des beschriebenen Ansatzes ist, wie gut die automatisch abgeleiteten Fassadengrammatiken unterschiedliche Architekturstile erfassen und wiedergeben können. Zur visuellen Einschätzung der strukturellen Vielfalt, die durch individuelle Regelsysteme erreicht werden kann, wurde ein beliebiger grober Gebäudeblock der Stuttgarter Innenstadt unter Verwendung verschiedener Fassadengrammatiken mehrere Male verfeinert. Die eingesetzten Grammatiken wurden allesamt automatisch aus Fassadenstrukturen extrahiert, die entweder aus dem datengetriebenen Rekonstruktionsansatz des Abschnitts 2.1 resultieren oder manuell auf der Grundlage von Bildern erzeugt wurden. Die Grammatiken repräsentieren sehr unterschiedliche Fassadengestal-

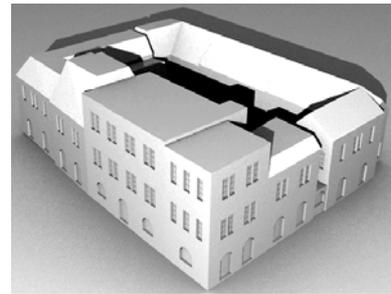
tungen. Sie zeigen die Architekturstile von historischen (Abbildung 5a,b,c) und neu errichteten Gebäuden (Abbildung 5e,h) sowie von Gebäuden, die entweder rein funktional ausgerichtet sind (Abbildung 5d,g) oder das Ergebnis künstlerischer Ambitionen darstellen (Abbildung 5i). Die Fensteranordnungen reichen dabei von „vollkommen regelmäßig“ (Abbildung 5a,e,g) über „abwechslungsreich“ (Abbildung 5b,c) bis hin zu „chaotisch“ (Abbildung 5i).



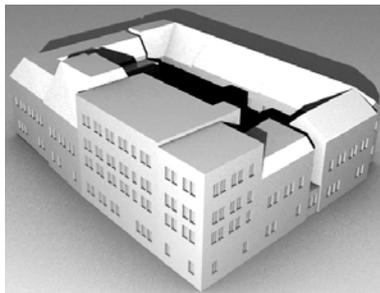
(a) Stil 'Linden-Museum'



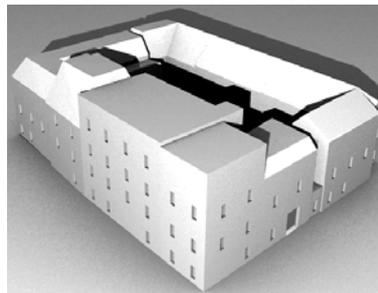
(b) Stil 'Alte Kanzlei'



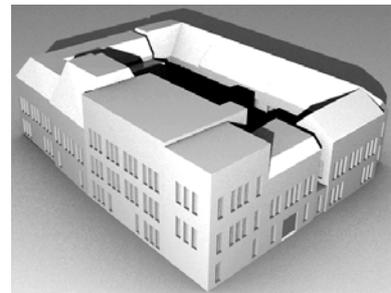
(c) Stil 'Prinzenbau'



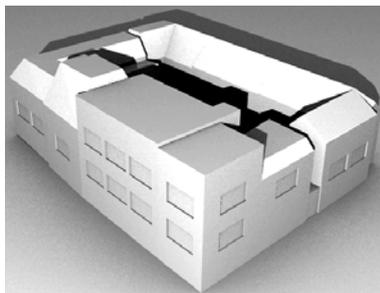
(d) Stil 'Bürogebäude'



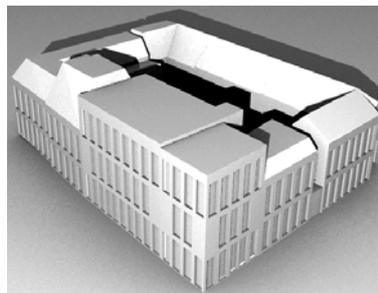
(e) Stil 'Bibliothek 21'



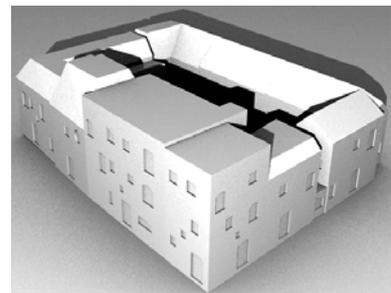
(f) Stil 'Bosch-Areal'



(g) Stil 'Kollegiengebäude II'



(h) Stil 'Informatikgebäude'



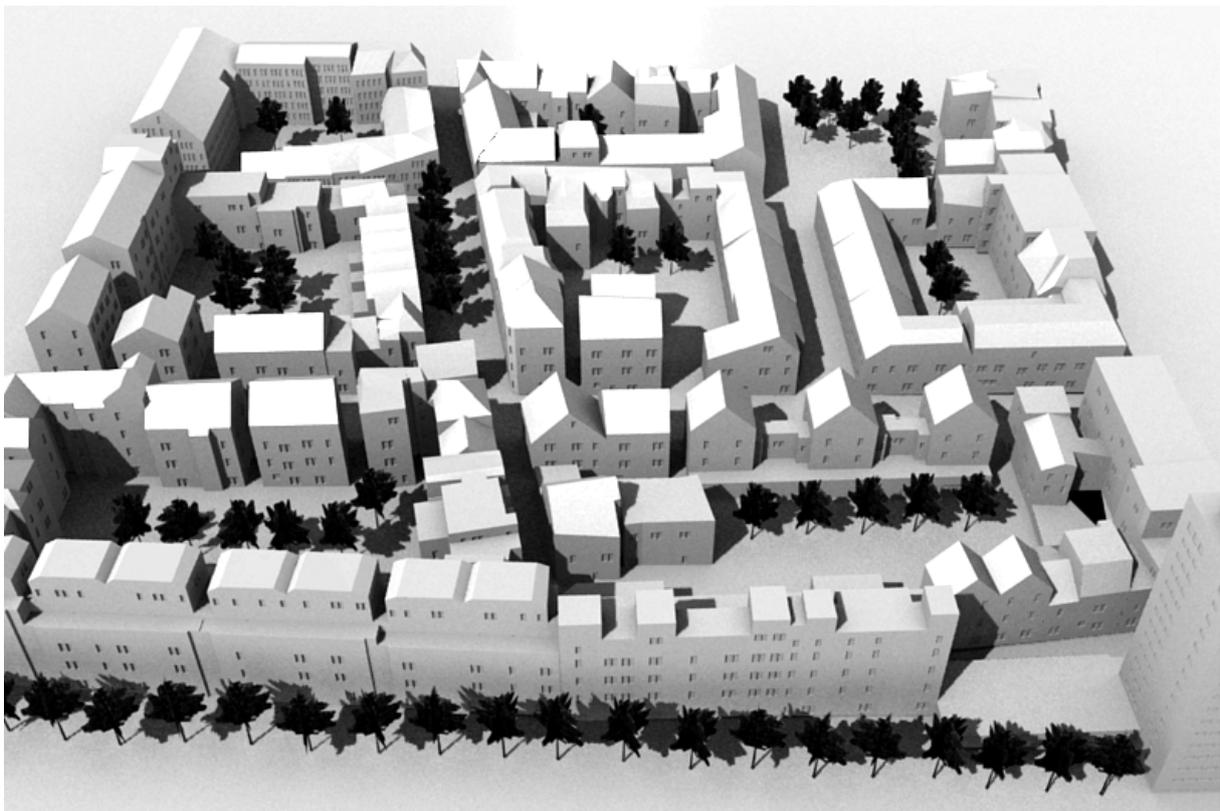
(i) Stil 'Hundertwasser'

*Abb. 5: Gebäudeblock der Stuttgarter Innenstadt, modelliert mit neun verschiedenen Fassadengrammatiken*

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Das beschriebene Verfahren erlaubt die automatische Rekonstruktion vollständiger 3D-Fassadenmodelle. Regelsysteme werden von beobachteten Fassadengeometrien extrahiert und für die Generierung synthetischer Fassadenstrukturen genutzt. Die Ableitung individueller Fassadengrammatiken garantiert dabei realistische Rekonstruktionsergebnisse: Liegen für eine zu modellierende Fassade ungenaue oder unvollständige Sensordaten vor, können die Grammatikregeln zur Verbesserung und Vervollständigung der Fassadenstrukturen eingesetzt werden. Auf dieselbe Weise lassen sich selbst für völlig unbeobachtete Fassaden Strukturinformationen im Stil des betreffenden Gebäudes präzisieren.

Darüber hinaus ist das vorgestellte Konzept der grammatikbasierten Modellierung von Gebäudestrukturen nicht auf Fassaden beschränkt. Stattdessen bietet es die Grundlage für zahlreiche weitere Anwendungsgebiete. Dies erfordert eine



*Abb. 6: Grammatikbasierte Rekonstruktion von Fassadenstrukturen und Bäumen am Beispiel des Stuttgarter Bohnenviertels*

Erweiterung und Abstraktion des durch lineare Zeichenketten darstellbaren Fassadenszenarios hin zu einer hierarchisch gestalteten und auf Graphen basierenden Modellierungsstruktur für städtische Umgebungen. Dadurch eröffnen sich bezüglich der darstellbaren Objekte und der zwischen diesen Objekten geltenden Beziehungen nahezu unbegrenzte Möglichkeiten. Eine erste beispielhafte Anwendung ist das in Abbildung 6 gezeigte prozedurale Anlegen von Stadtvegetation. Die Fassadenstrukturen des dargestellten Stuttgarter Viertels wurden zuvor mit Hilfe automatisch abgeleiteter Fassadengrammatiken generiert.

## Literatur

- Becker, S. (2011): Automatische Ableitung und Anwendung von Regeln für die Rekonstruktion von Fassaden aus heterogenen Sensordaten. München 2011, ISBN 978-3-7696-5070-9, 156 S.
- Becker, S. (2009): Generation and application of rules for quality dependent façade reconstruction. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64:640–653.
- Becker, S. und Haala, N. (2008): Integrated LIDAR and image processing for the modelling of building facades. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation (PFG)*, 2/2008:65–81.
- Haala, N., Becker, S., und Kada, M. (2006): Cell decomposition for the generation of building models at multiple scales. In *Proceedings of the ISPRS Symposium Photogrammetric Computer Vision (PCV '06)*, S. 19–24.
- Kada, M. (2006): 3D building generalization based on half-space modeling. In *Proceedings of the ISPRS Workshop on Multiple Representation and Interoperability of Spatial Data*, 6 S.
- Kutterer, H. (2010): *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*, Kapitel: Mobile Mapping, S. 293–311. Whittles Publishing.
- Müller, P., Vereenoghe, T., Wonka, P., Paap, I., und van Gool, L. (2006a): Procedural 3D reconstruction of Puuc buildings in Xkipché. In *Eurographics Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage (VAST)*, S. 139–146.
- Müller, P., Wonka, P., Hägler, S., Ulmer, A. und van Gool, L. (2006b). Procedural modeling of buildings. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 25(3):614–623.
- Rothermel, M. und Haala, N. (2011): Potential of Dense Matching for the Generation of High Quality Digital Elevation models. In: *Proceedings of ISPRS Hannover Workshop High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information*, 6 S.