

Automatische Ableitung und Anwendung von Regeln für die Rekonstruktion von Fassaden aus heterogenen Sensordaten

Von der Fakultät Luft- und Raumfahrttechnik und Geodäsie
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktors
der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Susanne Becker
aus Mühlacker

Hauptberichter:	Prof. Dr.-Ing. Dieter Fritsch
Mitberichter:	Prof. Dr. rer. nat. Lutz Plümer
Mitberichter:	Prof. Dr. rer. nat. Dr. h.c. Kurt Rothermel

Tag der mündlichen Prüfung: 15. November 2010

Institut für Photogrammetrie
der Universität Stuttgart
2011



DGK Deutsche Geodätische Kommission
bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C

Dissertationen

Heft Nr. 658

**Automatische Ableitung und Anwendung
von Regeln für die Rekonstruktion von Fassaden
aus heterogenen Sensordaten**

Von der Fakultät Luft- und Raumfahrttechnik und Geodäsie der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Susanne Becker

München 2011

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission beim Verlag C. H. Beck

Adresse der Deutschen Geodätischen Kommission:



Deutsche Geodätische Kommission

Alfons-Goppel-Straße 11 • D – 80 539 München

Telefon +49 – 89 – 23 031 1113 • Telefax +49 – 89 – 23 031 - 1283/ - 1100

e-mail hornik@dgfi.badw.de • <http://www.dgk.badw.de>

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Dieter Fritsch

Mitberichter: 1. Prof. Dr. rer. nat. Lutz Plümer

2. Prof. Dr. rer. nat. Dr. h.c. Kurt Rothermel

Tag der mündlichen Prüfung: 15. November 2010

© 2011 Deutsche Geodätische Kommission, München

Alle Rechte vorbehalten. Ohne Genehmigung der Herausgeber ist es auch nicht gestattet,
die Veröffentlichung oder Teile daraus auf photomechanischem Wege (Photokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen

ISSN 0065-5325

ISBN 978-3-7696-5070-9

Kurzfassung

3D-Stadtmodelle finden seit einigen Jahren in immer stärkerem Maß und in den verschiedensten Bereichen Verwendung. Sie bilden unter anderem die Grundlage bei Stadtplanungen, für virtuelle Stadtrundgänge oder für die Berechnung von Simulationen. Internetdiensten wie Google Earth oder Microsoft Bing Maps ist es zu verdanken, dass 3D-Darstellungen von Gebäuden mittlerweile auch für eine breite Öffentlichkeit allgegenwärtig sind. Die erhöhte Nachfrage nach 3D-Gebäudemodellen verlangt nach effizienten Rekonstruktionsmethoden, die sich vor allem durch einen hohen Automationsgrad auszeichnen. Als Datengrundlage werden häufig luftgestützt erfasste LiDAR-Punktwolken oder Bilder eingesetzt. In der Natur dieser Daten liegt es begründet, dass die daraus rekonstruierten Gebäude üblicherweise zwar detaillierte Dachstrukturen, aber ebene, nicht ausmodellerte Fassadenflächen besitzen. Neue Trends in der Computergraphik, der Unterhaltungsindustrie oder im Bereich der Navigationssysteme treiben jedoch die Entwicklung wesentlich komplexerer und realistischerer Modelle voran. Der geforderte Detailreichtum ist dabei nicht auf die geometrische Ausgestaltung der Gebäudefassaden beschränkt, sondern bezieht ebenso den semantischen Informationsgehalt mit ein. Die für das Anreichern ebener Fassadenflächen notwendige Strukturinformation wird in der Regel aus terrestrisch erfassten LiDAR-Punktwolken oder Bilddaten abgeleitet. Rein datengetriebene Auswertungen führen nur bei qualitativ hochwertigen Messungen zu sicheren und realitätsnahen Ergebnissen. Je nach Aufnahmekonfiguration und Sensorgenauigkeit weisen Datensätze jedoch häufig eine heterogene Qualität bezüglich Genauigkeit, Abdeckung und Dichte auf. Dies gilt sowohl für Daten aus hoch spezialisierten Messsystemen, wenn beispielsweise Sichthindernisse zu partiellen Verdeckungen führen, als auch insbesondere für Daten aus kostengünstigen, einfach einsetzbaren Sensoren. Um auch im Fall unscharfer oder unvollständiger Sensordaten realistische 3D-Geometrien erzeugen zu können, muss die Rekonstruktion durch Objektwissen gestützt werden. Entsprechende Algorithmen integrieren Wissen beispielsweise in Form vordefinierter Regelsysteme, die eine prozedurale Modellierung von Gebäudestrukturen in einem bestimmten vorgegebenen architektonischen Stil erlauben.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Verfeinerung bestehender grober Gebäuderepräsentationen, indem Fassadenelemente wie Fenster oder Türen in Form expliziter 3D-Geometrien mit bekannter Semantik integriert werden. Die Fassadenrekonstruktion soll vollautomatisch ablaufen und robust gegenüber fehlerhaften und unvollständigen Sensordaten sein. Zudem soll sie möglichst wenig vordefinierten Regeln unterworfen sein. Realisiert wird dies über eine Kombination datengetriebener und wissensbasierter Methoden. Die datengetriebene Komponente beruht im Wesentlichen auf der Interpretation terrestrischer LiDAR-Daten und auf dem Prinzip der Zellenzerlegung. In Gebäudebereichen mit guter Sensordatenqualität werden 3D-Fassadengeometrien extrahiert. Sie repräsentieren für das jeweilige Gebäude charakteristische Strukturen und dienen somit als eine Art Wissensbasis, aus der eine formale Grammatik, im Weiteren als Fassadengrammatik bezeichnet, automatisch abgeleitet werden kann. Durch eine Segmentierung der Fassade in semantisch homogene Regionen werden in einem ersten Schritt die Grundbausteine der Grammatik, die Terminale, bestimmt. Ausgedrückt als eine Sequenz von Terminalen kann die Fassade anschließend über einen stringbasierten Algorithmus auf wiederkehrende und hierarchische Strukturen untersucht werden. Die erkannten Strukturen werden automatisch in Produktionsregeln überführt; die Fassadengrammatik ist damit vollständig bestimmt. Sie enthält die Information, die zur Rekonstruktion von Gebäuden im Stil der beobachteten Fassade notwendig ist. Durch Anwendung der Produktionsregeln kann sie genutzt werden, um selbst für solche Fassadenbereiche realistische Fassadenstrukturen zu generieren, die entweder gar nicht beobachtet wurden oder mit Sensordaten von nur ungenügender Qualität abgedeckt sind.

Das Potenzial des vorgestellten Ansatzes wird anhand von Ergebnissen aufgezeigt. Für die Bewertung der erzeugten Fassadenmodelle werden Qualitätsmetriken bereitgestellt, über die sich eine Aussage treffen lässt, wie gut das architektonische Erscheinungsbild des jeweiligen Gebäudes wiedergegeben ist. Das Verfahren zur Fassadenrekonstruktion erweist sich als geeignet, um mit Beobachtungsdaten heterogener Qualität umzugehen, und ist darüber hinaus flexibel hinsichtlich der darstellbaren Fassadenstrukturen.

Abstract

3D city models are of growing interest in various application areas. For instance, they are the basis for city planning, virtual sightseeing tours or simulations. Meanwhile, due to internet services such as Google Earth or Microsoft Bing Maps, 3D representations of buildings are becoming ubiquitous and find their way to the general public. The increasing demand for 3D building models requires efficient reconstruction techniques with a high degree of automation. Mostly generated from airborne LiDAR or image data, building models usually feature detailed roof shapes but planar, unstructured façades. However, new developments in the areas of computer graphics, the entertainment industry or navigation systems push the demand for more complex and realistic models. The desired amount of detail is not limited to geometric aspects, but also includes semantic information. In this context, knowledge about the functionality of different façade parts is an important aspect. Frequently, terrestrial LiDAR point clouds and images are used to extract high resolution building structures for the enrichment of planar façades. Such a purely data driven modelling only leads to robust and realistic façade models if the available observations meet considerable requirements on data quality. Depending on sensor accuracy and the geometric configuration during data acquisition, measurements often exhibit heterogeneous quality situations concerning accuracy, coverage and density. This holds true for data from specialised sensor systems, when for example obstacles in the line of sight lead to partial occlusions, as well as particularly for data from low cost sensors. To ensure the generation of realistic 3D geometries even for inaccurate and incomplete measurements, reconstruction has to be supported by additional object information. Therefore, some algorithms introduce knowledge about the appearance and arrangement of objects through manually predefined rule systems for the procedural modelling of building structures in a certain architectural style.

This work aims at the refinement of existing coarse building models by integrating three-dimensional façade geometry with explicit semantic information, for example windows or doors. The façade reconstruction ought to run fully automatically through all processing steps. Furthermore, the approach should be robust against erroneous and incomplete sensor data, but not subject to prespecified rules in order to achieve a maximum degree of flexibility. For this purpose, data driven and model based methods, also known as bottom-up and top-down strategies, are combined. The data driven part mainly consists of the interpretation of terrestrial LiDAR data and applies cell decomposition for the modelling process. Building areas covered by dense and accurate measurements are used to extract 3D façade geometries such as indentations and protrusions. Resulting façade models contain structures which are characteristic for the respective building and, thus, serve as knowledge base for the automatic derivation of a formal grammar called façade grammar. In a first step, the façade is segmented into semantically homogeneous regions that can be regarded as indivisible. They represent the basic elements of the grammar, the terminals. Expressed as a sequence of terminals, the façade can subsequently be searched for repetitive and hierarchical structures by means of a string based algorithm. After the detected structures have been automatically translated into production rules, the façade grammar is complete. With its individual terminals and rules, the grammar holds all the information which is necessary to reconstruct buildings in the style of the observed façade. By applying the production rules, realistic façade structures can be generated even for building regions for which no sensor data or only measurements of poor quality are available.

The potential of the proposed approach for 3D façade reconstruction is demonstrated through several examples with different building characteristics. In order to evaluate the generated façade models, quality metrics are provided which quantify to which extent the model reflects the architectural appearance of the real building. The façade reconstruction proves to be appropriate to cope with data of heterogeneous quality. Furthermore, it is flexible towards the great variety of structures to be modelled.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	11
1.1	Motivation	11
1.2	Fassadenrekonstruktion	13
1.2.1	Datengetriebene Rekonstruktion	14
1.2.2	Modellgetriebene Rekonstruktion	15
1.3	Zielsetzung	17
1.4	Gliederung	19
2	Grammatik in der Architektur	20
2.1	Prinzipien in der Architektur	21
2.2	Allgemeine und formale Definition von Grammatik	23
2.3	Chomsky-Hierarchie	26
2.3.1	Typ-0-Grammatik	27
2.3.2	Typ-1-Grammatik	27
2.3.3	Typ-2-Grammatik	28
2.3.4	Typ-3-Grammatik	28
2.4	Lindenmayer-Systeme	28
2.4.1	Prinzip	29
2.4.2	Geometrische Interpretation	32
2.4.3	Anwendungen in der Stadtmodellierung	33
2.5	Formengrammatik	34
2.6	Split-Grammatik	36
2.7	CGA-Formengrammatik	37
2.8	Fassadengrammatik	38
3	Datengrundlagen	42
3.1	3D-Datenerfassung mittels Laserscansystemen	42
3.2	Registrierung	45
3.2.1	Registrierung von Laserpunktwolken	45
3.2.2	Registrierung von Bildern	46
3.2.3	Registrierung von Laserpunktwolken und Bildern	47
3.2.4	Durchgeführter Ansatz zur Registrierung von Laserpunktwolken und Bildern	48
3.3	Objektrepräsentation	51
4	Datengetriebene Fassadenrekonstruktion	54
4.1	Klassifizierung der 3D-Punkte	55
4.1.1	Grobklassifizierung von Fassadenpunkten	55
4.1.2	Feinklassifizierung	56
4.2	Erzeugung von 3D-Zellen	57
4.2.1	Detektion von Kantenpunkten	57
4.2.2	Zellenzerlegung	59
4.3	Klassifizierung von 3D-Zellen	60
4.3.1	Grobklassifizierung von Zellen	60
4.3.2	Feinklassifizierung durch geometrische Bedingungen	61

4.4	Verifikation der Strukturen	62
4.4.1	Fensteraufteilung	63
4.4.2	Fensterform	64
4.5	Modellierung	66
4.5.1	Verschmelzung der Zellen	66
4.5.2	Erweiterte Modellierung	67
4.6	Optionale bildbasierte Verfeinerung	68
4.6.1	Ableitung von 3D-Kanten	68
4.6.2	Rekonstruktion zusätzlicher Fassadenstrukturen	70
4.7	Ergebnisse	72
4.8	Diskussion	74
4.8.1	Allgemeine Betrachtungen	74
4.8.2	Zuverlässigkeit des Verfahrens	76
4.8.3	Grenzen des Verfahrens	78
5	Ableitung von Modellwissen	81
5.1	Bestimmung der Terminale	81
5.1.1	Segmentierung der Fassade in Kacheln	82
5.1.2	Klassifizierung der Kacheln	84
5.2	Beziehung zwischen den Terminalen	86
5.3	Ableitung von Produktionsregeln	91
5.3.1	Aufbau und Funktion der Produktionsregeln	92
5.3.2	Eigenschaften der Produktionsregeln	94
6	Modellbasierte Fassadenrekonstruktion	97
6.1	Produktion	97
6.1.1	Nichtterminal-Selektion	97
6.1.2	Regel-Selektion	99
6.2	Geometrische Einpassung der Kacheln	102
6.2.1	Interpretation als Federmodell	102
6.2.2	Berechnung durch mathematische Optimierung	104
6.3	Vervollständigung	110
6.3.1	Zielvorgabe der Vervollständigung	110
6.3.2	Bestimmung des dichten Punktebereichs	111
6.3.3	Vervollständigung durch Erzeugung von Fassadenstrukturen	114
6.4	Verifikation	114
6.4.1	Zielvorgabe der Verifikation	115
6.4.2	Verifikation der generierten Hypothesen	115
7	Ergebnisse und Diskussion	120
7.1	Beispiele für grammatikbasierte Rekonstruktion	120
7.2	Bewertung prozedural generierter Fassadenstrukturen	127
7.2.1	Konzept zur Bewertung der Qualität	127
7.2.2	Auswertung und Interpretation	130
7.3	Flexibilität des Verfahrens	134
7.3.1	Anwendbarkeit des Verfahrens	134
7.3.2	Skalierbarkeit des Verfahrens	138
7.4	Grenzen des Verfahrens und mögliche Erweiterungen	141
8	Zusammenfassung und Ausblick	143

Literaturverzeichnis**147****Lebenslauf****157****Dank****158**

1 Einleitung

1.1 Motivation

Sich über Suchfunktionen im Internet fast mühelos von einem gesuchten Begriff zum nächsten zu bewegen, ist mittlerweile Alltag geworden. Auf ähnliche Weise in einer virtuellen dreidimensionalen Welt navigieren zu können, stellt dagegen noch Zukunftsmusik dar. Eine reizvolle noch dazu: In miteinander vernetzten Informationen zu Gebäudemodellen lesen zu können wie in einem Buch, Verbindungen herstellen und Sinnzusammenhänge erkennen zu können, motiviert zu neuen Forschungsansätzen, die der Vision eines voll interpretierten 3D-Stadtmodells folgen. 3D-Stadtmodelle werden bereits seit vielen Jahren für zahlreiche Anwendungen eingesetzt. Dazu gehören Simulationen und Visualisierungen in den Bereichen Stadtplanung, Immobilienvermarktung, Sicherheit, Telekommunikation, Katastrophenmanagement, Klima- und Lärmschutz, erneuerbare Energien, Tourismus- und Unterhaltungsbranche, um nur einige zu nennen. Anwendungen wie Google Earth oder Bing Maps von Microsoft ermöglichen darüber hinaus jedem Internet-Nutzer, interaktiv beliebige Ansichten von virtuellen Umgebungen zu generieren. Viele Städte, darunter auch Berlin und Hamburg, nutzen Plattformen wie diese, um sich einer breiten Öffentlichkeit virtuell zu präsentieren. 3D-Stadtmodelle, wie sie derzeit überwiegend verfügbar sind, basieren meist auf einem digitalen Geländemodell sowie auf 3D-Gebäudemodellen, die differenzierte Dachstrukturen besitzen, deren Fassaden aber durch ebene Flächen wiedergegeben sind. Detailinformationen bezüglich einzelner Gebäudekomponenten liegen üblicherweise nicht vor. Auf dieser Basis lassen sich zwar einzelne Gebäude mit Metadaten versehen, nicht aber Stockwerke, Türen oder Fenster. Genau das ist aber notwendig, um auch komplexe Suchanfragen und Navigationsaufgaben mit 3D-Bezug realisieren zu können. Der Weg zu einem detaillierten, voll interpretierten 3D-Stadtmodell führt über neue Technologien und Algorithmen zur effektiven Erfassung und Modellierung von Objekten städtischer Umgebungen, angefangen mit Gebäuden und ihren Fassadenkomponenten wie etwa Fenster und Türen, über 3D-Repräsentationen von Brücken, oder Haltestellen bis hin zu Gehwegen, Gullydeckeln, Parkuhren oder Verkehrszeichen, die alle als separate Objekte abgebildet werden.

Noch bis vor wenigen Jahren waren 3D-Stadtmodelle unmittelbar mit der flächendeckenden Datenerfassung aus der Luft verknüpft. Mittlerweile ist die luftgestützte Sensorplattform aber längst nicht mehr die einzige Datenquelle. Heutzutage erlauben neue Entwicklungen im Bereich terrestrischer Messsysteme eine ähnlich effiziente Erfassung der für ein Stadtmodell notwendigen 3D-Daten. Der auf diese Weise gewonnene Pool an Informationen eröffnet gleichzeitig auch völlig neue Möglichkeiten: Der Perspektivwechsel erlaubt den unmittelbaren Blick auf Gebäude, die der Wahrnehmung durch den Menschen in seinem städtischen Umfeld nahekommen. Neue Anwendungen ergeben sich auch aus der Tatsache, dass die Distanz zum beobachteten Objekt auf einen Bruchteil reduziert ist und der Detailreichtum im selben Maß angewachsen ist. Auf der Basis geometrischer und semantischer Informationen über Gebäude- und Fassadendetails können zum Beispiel Dach-, Grund-, Wand- und Fensterflächen als Ausgangspunkt für energetische Berechnungen ermittelt werden, die im Zuge der Energiesparpolitik und damit verbundenen Wärmedämmungsmaßnahmen immer wichtiger werden. Darüber hinaus erschließen sich neue Aufgabenfelder im Rahmen des Facility Managements. Virtuelle Stadtmodelle bieten zudem eine vielversprechende Navigationsgrundlage. Der Übergang von gewöhnlichem Kartenmaterial hin zu Darstellungen einer dreidimensionalen Umgebung verhilft zu einer schnellen und intuitiven Orientierung. Nutzen lässt sich dies etwa für die Fahrzeugnavigation oder die 3D-Navigation von Fußgängern. Auch für Anwendungen, die im Zusammenhang mit Erscheinungen wie „intelligenten Umgebungen“ stehen, liefern virtuelle 3D-Räume einen geeigneten Bezugsrahmen, innerhalb dessen Objekte miteinander in Beziehung treten und Teil komplexer Prozessabläufe werden können. Weitere Einsatzmöglichkeiten sind großmaßstäbige architektonische Planungen und Visualisierungen. Realistische

3D-Repräsentationen lassen zudem Computerspiele noch realistischer wirken, wenn die bislang verwendeten erfindenen Schauplätze durch 3D-Repräsentationen tatsächlich existierender Lokalitäten ersetzt werden.

Ausgehend von Prototypen in den 1990er Jahren hat sich eine Vielfalt an kommerziellen terrestrischen Erfassungssystemen herausgebildet, die als sogenannte Mobile Mapping-Systeme 3D-Daten bereitstellen. Sie umfassen Aufnahmesensoren wie digitale Kameras und Laserscanner sowie Navigationskomponenten zur Georeferenzierung der Daten. Rasante Fortschritte auf dem Gebiet der Sensortechnologie sorgen für Punktwolken in immer höherer Dichte und Genauigkeit. Mit der Verfügbarkeit neuer Sensoren, Aufnahme- und Auswertemethoden steigen auch die Ansprüche an die daraus abgeleiteten Informationen in geometrischer wie in semantischer Hinsicht. Dies bezieht sich sowohl auf die Genauigkeit der 3D-Gebäudemodelle als auch auf deren Detailgrad. Der Nutzer gibt sich nicht mehr mit einfachen Modellen in Gestalt grober Gebäudeblöcke zufrieden, sondern erwartet Darstellungen, die seinem in der Realität gewonnenen Eindruck möglichst genau entsprechen. Eine wesentliche Rolle spielt hierbei die Fassade, da sie den Stil eines Gebäudes unmittelbar widerspiegelt. Die Art der Fassadenmodellierung entscheidet über die Wiedererkennbarkeit beziehungsweise Realitätsnähe des Gebäudemodells.

Ein häufig verfolgter Ansatz ist, das Erscheinungsbild ebener Gebäudefassaden durch Bildtexturen zu verfeinern. Als Datenquelle dienen hier beispielsweise Schrägluftbilder, in denen die Fassadenflächen gut erkennbar sind. Schrägluftbilder bieten insbesondere in bebauten Gebieten eine ausgezeichnete Orientierungshilfe. In Anwendungen wie Bing Maps sind sie bereits als Alternative oder Ergänzung zu 3D-Stadtmodellen integriert. Die hierfür mit dem Pictometry-Kamerasystem aufgenommenen georeferenzierten Schrägluftbilder können ebenso als Grundlage für eine automatisch durchgeführte Texturierung von Gebäudeflächen verwendet werden. Mit einer typischen Auflösung von 10 bis 12 cm und einer Positionsgenauigkeit von circa 50 cm eignen sie sich jedoch nur begrenzt für realistische Ansichten aus der Perspektive eines Fußgängers. Diese Zwecke erfüllen terrestrisch erfasste Bilder, wie sie beispielsweise von Google Street View oder Microsoft Streetside genutzt werden. Einen Ansatz für die Erzeugung realistisch texturierter Fassadenflächen liefern beispielsweise Cornelis et al. (2008). Gebäuderepräsentationen wie diese, in denen Grauwertinformationen eine explizite Modellierung von 3D-Fassadenstrukturen ersetzen, ergeben dann ansprechende Visualisierungen, wenn die Fassadenoberfläche des Gebäudemodells die reale Fassadengeometrie hinreichend genau approximiert. Nicht rekonstruierte signifikante Gebäudevorsprünge oder Fassadenvertiefungen können vor allem unter einem schrägen Blickwinkel zu unerwünschten Effekten führen. Das Fehlen semantischer Information schränkt den Nutzen weiter ein. Anwendungen, die über bloße Visualisierungsaufgaben hinausgehen wie zum Beispiel die 3D-Fußgängernavigation oder energetische Berechnungen für Hausfassaden, setzen Kenntnisse voraus, die sowohl die Position und geometrische Ausdehnung relevanter Fassadenelemente betreffen als auch deren Bedeutung und strukturellen Zusammenhänge. In den Fokus des Interesses treten daher vermehrt Gebäudemodelle, die in sinnvolle geometrische und semantische Einheiten segmentiert sind. Ihre Modellierung erfordert ontologische Strukturen, die Attribute, thematische Klassen sowie Beziehungen einzelner Komponenten untereinander abzubilden in der Lage sind. Sie ebnen den Weg für eine neue Generation von 3D-Stadtmodellen, die sich durch einen hohen geometrischen Detailgrad und komplexe semantische Informationen auszeichnen. Gebäudemodelle in der geforderten hohen Qualität bereitzustellen, ist derzeit oftmals noch mit einem erheblichen manuellen Aufwand verbunden. Ein großer Bedarf besteht daher in der Entwicklung weitestgehend automatisch ablaufender Methoden, mit denen entsprechende 3D-Modelle erzeugt beziehungsweise bestehende 3D-Stadtmodelle um die fehlenden Informationen angereichert werden können.

Die Qualität, in der sich Gebäudestrukturen rekonstruieren lassen, wird im Wesentlichen durch die Genauigkeit, Auflösung und Vollständigkeit der verfügbaren Sensordaten bestimmt. Bei der Datenerfassung aus der Luft kann üblicherweise mit einer nahezu konstanten Genauigkeit und Auflösung sowie einer quasi verdeckungsfreien Sicht auf die Gebäude gerechnet werden. Anders liegt der Fall bei der terrestrischen Aufnahme. Beschränkungen ergeben sich hier bezüglich einer vollständigen Erfassung, wenn einzelne Objektbereiche für das einzusetzende Sensor-Equipment unzugänglich sind. So lassen sich beispielsweise mit Mobile Mapping-Systemen von vornherein lediglich die der Straße zugewandten Gebäudeflächen beobachten. Darüber hinaus verhindern häufig auftretende Sicht-Hindernisse wie etwa Bäume oder Autos eine lückenlose Erfassung, so dass einzelne Gebäudebereiche nur unvollständig oder gar nicht in der aufgemessenen 3D-Punktwolke repräsentiert sind. In einer von Rutzinger et al. (2009) durchgeführten Studie konnten zum Beispiel nur 56 % der mit mobilem Laserscanning aufgenommenen Fassaden

in den 3D-Punkten als Wandflächen identifiziert werden. Die Autoren begründen dies mit partiellen Verdeckungen durch Vegetation und Zäune. Derartige Beeinträchtigungen sind typisch für terrestrisches Laserscanning und führen zu einer stark variierenden und damit unvorhersehbaren Objektdeckung. Auch die Auflösung kann innerhalb eines Datensatzes je nach Aufnahmedistanz und Blickwinkel deutlichen Schwankungen unterworfen sein. Qualitätsunterschiede wie diese, die selbst in Daten aus hoch spezialisierten Messsystemen zu beobachten sind, werden im Zusammenhang mit nutzergenerierten Inhalten noch offensichtlicher. Allgemein verfügbare Low-Cost-Sensoren sowie eine wachsende Zahl webbasierter Anwendungen - beispielhaft seien hier der ARC 3D-Webservice (Vergauwen und van Gool, 2006) und Photosynth (Snavely, 2008) genannt - machen es auch Laien möglich, schnell und einfach dreidimensionale Objektszenen durch Punktwolken oder virtuelle 3D-Ansichten darzustellen. Bestehende Rekonstruktionsmethoden sind oftmals auf bestimmte Daten mit einer definierten Auflösung und Genauigkeit zurechtgeschnitten und dadurch in ihrer Anwendbarkeit beschränkt. Die mit der zunehmenden Vielfalt von Sensoren und Datenquellen einhergehende Heterogenität der Datenqualität fordert hingegen hoch flexible und robuste Auswertestrategien und formuliert somit neue Anforderungen an die Gebäuderekonstruktion.

1.2 Fassadenrekonstruktion

Prinzipiell lassen sich bei der 3D-Objektrekonstruktion zwei grundsätzliche Klassen von Verfahren unterscheiden: die datengetriebenen und die modellgetriebenen. Auch unter den Begriffen „bottom-up“ (datengetrieben) und „top-down“ (modellgetrieben) bekannt, geben diese beiden Strategien entgegengesetzte Herangehensweisen an die Rekonstruktion vor. Datengetriebene Verfahren versuchen, direkt aus den beobachteten Daten 3D-Informationen abzuleiten. Zunächst werden einfache Grundelemente wie Punkte, Kanten oder Flächen extrahiert, welche dann schrittweise zu komplexeren Strukturen zusammengefügt werden. Die datengetriebene Modellierung beschreibt damit einen Syntheseprozess, welcher durch die Einbindung geometrischer Bedingungen bezüglich Parallelität, Koplanarität oder Rechtwinkligkeit stabilisiert werden kann. Im Gegensatz dazu entspricht die modellgetriebene Rekonstruktion einem Analysevorgang mit dem Ziel, durch Zerlegung eines gegebenen Systems Einblick in dessen Subkomponenten zu gewinnen. Die Steuerung der Analyse erfordert Kenntnis über geometrische und semantische Eigenschaften des zu rekonstruierenden Objekts. Dieses a priori Wissen wird zum Beispiel in Form parametrischer Modelle in den Rekonstruktionsprozess eingeführt. Aufgabe ist dabei, die Modelle in der Szene zu lokalisieren und anschließend bezüglich ihrer Parameter optimal an die beobachteten Daten anzupassen. Das Objekt wird somit über die Zerlegung in seine Grundbestandteile modelliert, wobei jedes dieser Basiselemente eine semantische Bedeutung impliziert.

Sowohl bottom-up als auch top-down Ansätze werden bereits seit vielen Jahren erfolgreich für die Gebäuderekonstruktion aus luftgestützt erfassten Daten eingesetzt (Brenner, 2005, 2010). Ein klassisches Beispiel für ein datengetriebenes Verfahren stellt die Arbeit von Baillard und Zisserman (1999) dar. Hierbei werden aus sechs überlappenden Bildern Liniensegmente extrahiert und über Korrespondenzbeziehungen in 3D-Kanten überführt. Anschließend werden für jede 3D-Kante die angrenzenden Halbebenen bestimmt, über Koplanaritätsbedingungen gruppiert und schließlich zu einem Polyeder zusammengefügt. Einen typischen modellgetriebenen Ansatz stellen Fischer et al. (1998) vor. A priori Wissen über mögliche Ausprägungen von Gebäudegeometrien wird in Form parametrisierter Modelle gespeichert und für die Erkennung und Modellierung von 3D-Gebäuden genutzt.

Während bei der Gebäuderekonstruktion aus luftgestützten Daten die korrekte Erfassung der Gebäudegrundrisse sowie die Modellierung unterschiedlicher Dachformen angestrebt wird, haben Anwendungen im Nahbereich die Rekonstruktion geometrischer Fassadenstrukturen zum Ziel. Auch hier bieten sich sowohl datengetriebene als auch modellbasierte Verfahren an. Während datengetriebene Verfahren vielfach für reine Szenevisualisierungen eingesetzt werden, ist bei der Generierung CAD-basierter Fassadenmodelle ein Trend zu modellbasierten Verfahren erkennbar. Auch stochastische Modellierung und automatisches Lernen treten mehr und mehr in den Mittelpunkt (Mayer, 2008). In den Abschnitten 1.2.1 und 1.2.2 werden grundlegende Entwicklungen in der Szene- beziehungsweise Fassadenrekonstruktion aus terrestrischen Daten aufgezeigt.

1.2.1 Datengetriebene Rekonstruktion

Datengetriebene Verfahren extrahieren aus beobachteten Daten 3D-Objektgeometrien, ohne dazu Vorwissen über geometrische oder topologische Objekteigenschaften zu benötigen. In Abhängigkeit der abgeleiteten 3D-Information kann die Objektszene unterschiedlich dargestellt werden. Die Palette der Möglichkeiten reicht von Punktwolken über Oberflächenmodelle und Drahtmodelle bis hin zu Volumenmodellen, wobei der Grad der geometrischen Interpretation dabei stetig zunimmt. Die vollautomatische Erzeugung von Punktwolken und Oberflächenmodellen wird seit einigen Jahren sowohl im Bereich der Photogrammetrie als auch in der Computer Vision erforscht. Zahlreiche Ansätze verfolgen die aus der Computer Vision stammende Technik „*Structure from Motion*“ (Nistér, 2004; Pollefeys et al., 2004; Vergauwen und van Gool, 2006; Pollefeys et al., 2008). Unter dem Begriff „*Structure from Motion*“ werden Methoden zusammengefasst, welche aus unkalibrierten Bildsequenzen automatisch dichte 3D-Punktwolken rekonstruieren. Entsprechende Algorithmen umfassen gewöhnlich die robuste Schätzung einer projektiven Rekonstruktion aus n-fachen Punktkorrespondenzen, die Autokalibration der Kamera sowie die Ableitung dichter Tiefeninformation. Akbarzadeh et al. (2006) und Mordohai et al. (2007) stellen darauf aufbauend fahrzeuggestützte Datenerfassungssysteme für die automatische 3D-Szenerekonstruktion vor. Auf der Basis von Bildfolgen und Orientierungsdaten aus GPS/INS-Messungen entstehen qualitativ hochwertige, texturierte Oberflächenmodelle. Ein Beispiel für die Integration von Laserscanning in die mobile Datenerfassung liefern Früh und Zakhor (2004). Die gemessenen 3D-Laserpunkte, die hier mit Hilfe von Luftbildern oder digitalen Höhenmodellen georeferenziert werden, können direkt als texturierte Punktwolke zur Szenemodellierung genutzt werden. Generell eignet sich die Repräsentation als 3D-Punktwolke oder Oberflächenmodell dann, wenn die Objektstruktur entweder komplex oder a priori unbekannt ist. Je nach Ausdehnung der Objektszene kann die dabei anfallende Datenmenge jedoch sehr groß werden. Einige Verfahren konzentrieren sich daher explizit auf die Modellierung von Architekturobjekten, um Annahmen bezüglich der Objektgeometrie treffen zu können. Typische geometrische Eigenschaften wie etwa die Planarität von Fassadenpunkten lassen sich zur Reduktion der Modellkomplexität nutzen. So interpretieren Cornelis et al. (2008) Fassadenschluchten als texturierte Regelflächen und erreichen so eine kompakte Modellbeschreibung. Mayer (2007) und Werner und Zisserman (2002) modellieren vertikale Fassadenebenen als Grundlage für weitere geometrische Verfeinerungen. Bauer et al. (2003) verstehen Fassaden als Konstrukt aus mehreren ebenen Flächenstücken. Neben der Fassadenebene selbst werden durch robuste Schätzmethoden auch Einbuchtungen oder Gebäudevorsprünge erfasst und in ein polygonales Oberflächenmodell überführt. Ähnliche Fassadenrepräsentationen erzeugen Xiao et al. (2008). Aus stark überlappenden Fassadenaufnahmen extrahieren sie zunächst horizontal und vertikal verlaufende Grauwertkanten, die in Kombination mit Tiefendaten die Basis für die Rekonstruktion von Fassadenstrukturen bilden.

Verfahren zur Erzeugung texturierter Oberflächenmodelle streben in erster Linie eindrucksvolle Visualisierungen an. Im Gegensatz dazu legen andere Ansätze den Schwerpunkt auf die geometrische Interpretation der Objektszene, indem sie diese als Komposition von Volumenprimitiven begreifen. Die Komplexität der angewendeten 3D-Primitive wirkt sich dabei direkt auf den erreichbaren Detailgrad der Rekonstruktion aus. Wilczkowiak et al. (2005) nähern relevante Objekte über Parallelfäche an. Darstellen lassen sich damit insbesondere Szenen, die von parallelen oder orthogonalen Flächen dominiert werden. Kompliziertere Strukturen können durch den Ansatz von Schnabel et al. (2007) modelliert werden, welcher bei der Rekonstruktion Ebenen, Kugeln, Zylinder, Kegel und Tori berücksichtigt.

Alle bisher beschriebenen Verfahren konzentrieren sich auf den rein geometrischen Aspekt der Rekonstruktion. Objektszenen werden als Oberflächenmodelle oder als Kombinationen von 3D-Primitiven dargestellt; semantische Informationen zu den erzeugten Strukturen werden dabei nicht generiert. Kenntnisse über die Semantik von Objekten oder Objektteilen werden jedoch bei einer Reihe von Anwendungen vorausgesetzt. Beispiele finden sich unter anderem im Bereich der Architekturplanung oder bei der Fußgängernavigation, wenn es etwa darum geht, eine Person direkt zum Eingang eines Gebäudes zu führen. Deshalb versuchen einige Ansätze in den beobachteten Bild- oder LiDAR-Daten Fassadenelemente wie Fenster und Türen zu identifizieren, um daraus Fassadenmodelle mit interpretierbaren Strukturen abzuleiten. Zhao und Shibasaki (2002) rekonstruieren städtische Szenen als interpretiertes Oberflächenmodell. Als Datengrundlage dienen fahrzeuggestützt erfasste LiDAR-Daten. Die semantische Interpretation der 3D-Punkte erfolgt über eine Klassifikation, welche die aus dem Scanvorgang stammenden

topologischen Beziehungen der 3D-Punkte nutzt. Unterschieden werden unter anderem Fassadenflächen, Fenster, Straßen und Bäume. Lee und Nevatia (2004) extrahieren Fensterstrukturen aus Fassadenbildern und integrieren diese in ein gegebenes 3D-Gebäudemodell. Fensterkandidaten werden dabei als homogene rechteckige Bildbereiche definiert und mit Hilfe einer histogrammbasierten Auswertung von Bildkanten gefunden. Die Verfeinerung eines vorhandenen groben 3D-Gebäudemodells steht auch bei Becker und Haala (2007b) im Vordergrund. In einer LiDAR-Punktwolke werden Fenster detektiert, indem innerhalb der Fassade nach größeren Bereichen ohne 3D-Punkte gesucht wird. Diese Vorgehensweise basiert auf der Feststellung, dass Fensterglas von Laserstrahlen durchdrungen wird und somit keine Reflexionsgrundlage bietet. Durch die Hinzunahme hoch aufgelöster Fassadenbilder können die extrahierten Fenster noch um weitere geometrische Details angereichert werden. Ein ähnlicher Ansatz findet sich bei Pu (2008). Auch hier werden Fenster über die Erkennung von Lücken in einer LiDAR-Punktwolke modelliert; eine optionale Integration von Fassadenaufnahmen ermöglicht es zusätzlich, die ermittelten Positionen der Fensterkanten zu verfeinern (Pu und Vosselman, 2009b). Da das vorgestellte Verfahren kein bestehendes 3D-Gebäudemodell voraussetzt, wird der Umriss von Fassaden durch Polygonanpassung an die Fassadenpunkte bestimmt. Für den Fall dichter Punktwolken lassen sich auf diese Weise gute Rekonstruktionsergebnisse erzielen. Probleme treten dann auf, wenn das zu modellierende Objekt infolge von Sichthindernissen nicht vollständig von LiDAR-Punkten abgedeckt ist. Abhängigkeit von der Datenqualität ist ein genereller Nachteil datengetriebener Verfahren. Da die geometrischen Strukturen direkt aus den Beobachtungsdaten modelliert werden, wirken sich fehlerhafte oder unvollständige Daten unmittelbar auf die Genauigkeit und Zuverlässigkeit des Rekonstruktionsergebnisses aus. In dieser Hinsicht verhalten sich modellbasierte Rekonstruktionsmethoden robuster. Entsprechende Algorithmen können die Datenunsicherheit kompensieren, indem sie Wissen über Form und Anordnung der Objektstrukturen integrieren.

1.2.2 Modellgetriebene Rekonstruktion

Die modellgetriebene Rekonstruktion beruht auf der Verwendung von a priori Wissen über das zu modellierende Objekt. Zum Einsatz kommen Kenntnisse über einzelne Subkomponenten und deren Zusammensetzung zum Gesamtobjekt. In Form von Modellen wird dieses Vorwissen zur Szeneanalyse genutzt. Die Modellbeschreibung kann dabei auf verschiedene Arten erfolgen. Sie ist geometrischer Natur, wenn sie als parametrisches 3D-Modell vorliegt. Statistische Szene- oder Objekteigenschaften werden als nicht-geometrische Templates formuliert. Wissen über den Objektaufbau sowie über topologische und semantische Beziehungen einzelner Objektteile kann in Form von Regeln festgehalten werden und auf diese Weise den Analyseprozess steuern. Genutzt wird das Modellwissen, um in einer Szene Objekte oder Objektbestandteile zu erkennen und bezüglich ihrer geometrischen Parameter zu bestimmen. In Algorithmen zur Fassadenrekonstruktion werden dafür häufig erscheinungsbasierte Verfahren und generative Modellierung angewendet. Erscheinungsbasierte Verfahren nutzen statistische Analyse und maschinelles Lernen für den Aufbau nicht-geometrischer Objektmodelle. Diese werden aus Bildern trainiert, welche die Objekte in unterschiedlichen Ansichten zeigen. In einer Lernphase werden charakteristische Objektmerkmale mit Hilfe statistischer Methoden bestimmt und zu verallgemeinerten Modellbeschreibungen aggregiert. Erst durch die explizite Zuweisung zum betreffenden Objekt entsteht semantische Bedeutung. Das Ergebnis sind nicht-geometrische Templates, auf deren Grundlage unbekannte Daten beurteilt werden können.

Als Beispiele erscheinungsbasierter Verfahren für die Interpretation von Fassadenbildern seien die Arbeiten von Reznik und Mayer (2008), Ali et al. (2007) sowie Wenzel und Förstner (2008) erwähnt. Gemeinsames Ziel ist die automatische Detektion von Fassadenstrukturen in terrestrischen Bildern. Reznik und Mayer (2008) verwenden sowohl für die Detektion als auch für die Bestimmung der Umrisse von Fenstern *Implicit Shape Models* (Leibe et al., 2004). *Implicit Shape Models* reduzieren die Bildinformation einer Fensterregion auf die räumliche Anordnung charakteristischer Objektbereiche. Sie ermöglichen damit eine kompakte Modellbeschreibung, die aus Trainingsdaten gelernt und für die Generierung von Fensterhypothesen genutzt wird. Die Validierung der Hypothesen erfolgt über Selbst-Diagnose; die Konfiguration der Fenster wird über die Modellauswahl gesteuert. Ali et al. (2007) überführen gegebene Bildinformationen in multiskalige Haar-Wavelet-Repräsentationen. Bezüglich des so entstandenen Merkmalsraums lassen sich die Fensterregionen durch Merkmalsvektoren kodieren und auf Basis einer Trainingsbildmenge erlernen. Bei Wenzel und Förstner (2008) werden wiederkehrende Fassadenstrukturen wie

Fenster oder Balkone automatisch identifiziert. Innerhalb eines inkrementellen Lernprozesses werden diese über eine Kombination aus erweiterter Hauptkomponententransformation (*engl.: Principal Component Analysis, PCA*) und linearer Diskriminanzanalyse (*engl.: Linear Discriminant Analysis, LDA*) für den Aufbau eines hierarchischen, erscheinungsbasierten Modells genutzt.

Während bei erscheinungsbasierten Verfahren Objekte sowie Beziehungen zwischen einzelnen Objektteilen über unterschiedliche Ansichten empirisch erfasst sind, werden diese bei generativer Modellierung analytisch dargestellt. Mit Hilfe analytischer Objektbeschreibungen, beispielsweise in Form geometrischer 3D-Modelle, lassen sich Bilddaten in semantisch sinnvolle Bereiche segmentieren. Das Prinzip besteht dabei darin, ein 3D-Modell des zu rekonstruierenden Objekts in den Bildraum zu projizieren. Voraussetzung dafür sind zumindest näherungsweise bekannte äußere und innere Orientierungsparameter. Differenzen zwischen dem so erzeugten simulierten und dem natürlichen Bild werden durch Änderung der Modellparameter in einem stochastischen Prozess minimiert. Dick et al. (2004) beweisen mit ihrer Arbeit über Modellierung und Interpretation von Architektur die Anwendbarkeit generativer stochastischer Modellierung auf die Fassadenrekonstruktion. Als Modellbeschreibung dient hier ein Satz von Wandelementen und parametrischen Primitiven wie zum Beispiel Fenster und Türen. Die stochastische Anpassung der Modellparameter basiert auf einer „reversible jump Markov Chain Monte Carlo“-Methode, welche nicht nur die Änderung der Parameter zulässt, sondern auch die Anzahl der geometrischen Primitive variieren kann.

Analytisches Wissen muss jedoch nicht zwangsläufig in Form geometrischer 3D-Modelle gegeben sein. Möglich ist auch die Beschreibung durch Operationen, welche zur Konstruktion des Objekts durchgeführt werden. Statt nur das Ergebnis der Objektrekonstruktion zu speichern, wird so der Konstruktionsprozess selbst repräsentiert. Das Konstruktionswissen umfasst Regeln, welche die Plausibilität und die topologische Korrektheit der rekonstruierten Objekte garantieren. Als wesentlicher Bestandteil formaler Grammatiken werden diese Regeln häufig für die generative Modellierung prozedural darstellbarer Objekte verwendet. Während die Regeln strukturelle Eigenschaften festlegen, steuert ein stochastischer Anteil die zufällige Auswahl von Regeln. Auf diese Weise kann mit einer einzigen Grammatik eine Vielfalt unterschiedlicher Objekte erzeugt werden. Ein bekanntes Beispiel für eine formale Grammatik liefern Prusinkiewicz und Lindenmayer (1990) mit den sogenannten Lindenmayer-Systemen. Es handelt sich dabei um einen mathematischen Formalismus, mit dem biologische Entwicklungsprozesse theoretisch erfasst werden können. Motiviert durch die realitätsnahe Modellierung von Pflanzen und die automatische Erzeugung komplexer Objekte wie zum Beispiel Fraktale, wird seit einigen Jahren im Bereich der Computergraphik auch die prozedurale Modellierung von Gebäuden untersucht (Parish und Müller, 2001; Marvie et al., 2005). Entscheidend ist dabei die Wahl einer geeigneten Grammatik. Lindenmayer-Systeme sind in erster Linie für die Beschreibung von Wachstumsprozessen konzipiert, welche im freien Raum stattfinden. Gebäuden hingegen steht in der Regel nur ein begrenzter Raum zur Verfügung. Zudem entspricht die Modellierung von Gebäuden eher einer sukzessiven Unterteilung des verfügbaren Raums als einem Wachstumsvorgang. Mit der sogenannten *Formengrammatik*, entwickelt von Stiny und Gips (1972), ist eine Grammatik gegeben, die speziell auf die Eigenschaften architektonischer Konstrukte zugeschnitten ist. Sie beinhaltet Regeln zur Spezifikation und Transformation von 2D- und 3D-Formen. Unter dem Begriff *Form* wird dabei eine endliche Anordnung gerader Linienstücke verstanden (Stiny, 1980a). Aufbauend auf der Formengrammatik präsentieren Wonka et al. (2003) eine *Split-Grammatik* für die explizite Modellierung von Fassadenstrukturen. Fassaden werden hierbei als Formen interpretiert, welche durch Teilungsoperationen (*engl.: splits*) iterativ in kleinere Formen zerlegt werden. Die kleinsten Einheiten bilden schließlich Fenster und Wandelemente. Müller et al. (2006b) nutzen dieses Prinzip für die prozedurale Modellierung detaillierter Gebäude ohne die Verwendung von Sensordaten: Über die *CGA-Formengrammatik* werden Gebäudeblöcke durch Kombination von 3D-Primitiven synthetisch erzeugt. Fassadenstrukturen entstehen durch Teilungen entlang der Fassadenachsen. Berücksichtigt werden sowohl die Hierarchie als auch die Semantik geometrischer Strukturen, wodurch plausible und topologisch korrekte Gebäude in unterschiedlichen Detailgraden generiert werden können. Andere Verfahren wenden formale Grammatiken auf Bilder oder Tiefendaten an, um die hierarchische Anordnung der Fassadenstrukturen zu erfassen. Zum Beispiel rekonstruieren Alegre und Delaert (2004) Fassaden auf der Grundlage von Bilddaten, wobei die durchgeführten horizontalen und vertikalen Fassadenschnitte über eine stochastische kontextfreie Grammatik gesteuert werden. Brenner und Ripperda (2006) arbeiten sowohl auf Bildern als auch auf Tiefendaten. Fassadenstrukturen werden mit Hilfe einer reversible jump Markov Chain Monte Carlo - Methode bestimmt und als Ableitungsbaum dargestellt. Unter Einbeziehung von

Bedingungsgleichungen erfolgt danach die Feinanpassung der extrahierten Geometrien an die beobachteten Sensordaten. Schmittwilken et al. (2009) extrahieren zunächst aus 3D-Punktwolken ebene Flächenstücke, um diese anschließend mit der Methode der Conditional Random Fields in Fassaden-, Fenster-, Tür- und Treppenflächen zu klassifizieren. Eine speziell für die Beschreibung von Treppenstrukturen konzipierte Attributgrammatik unterstützt die Detektion und Rekonstruktion von Treppen in Eingangsbereichen.

Generell erlauben modellbasierte Rekonstruktionstechniken die automatische Generierung von 3D-Gebäuden in einem vordefinierten architektonischen Stil. Dieser Stil muss manuell vorgegeben und in eine Modellrepräsentation überführt werden, beispielsweise in Form eines 3D-Modells oder einer Grammatik. Er beschreibt eine Wissensbasis, welche die Vielfalt der darstellbaren Fassadenstrukturen festlegt. Mögliche Erscheinungsformen von Fassadenelementen sind auf vordefinierte Ausprägungstypen beschränkt, selbst wenn Freiheitsgrade bezüglich einzelner geometrischer Parameter bestehen. Auch die Anordnung von Fassadenstrukturen ist zumindest grob vorgegeben. Dafür sorgen die in vordefinierten Grammatikregeln verankerten Teilungsmechanismen oder bereits im Vorfeld angelegte hierarchische Strukturierungen von Gebäudekomponenten, wie es etwa bei Finkenzeller (2008) der Fall ist. Um hinsichtlich der darstellbaren Fassadenstrukturen flexibler zu sein, versuchen einige Verfahren, Wissen aus beobachteten oder gegebenen Daten abzuleiten. Beispielsweise extrahiert Ripperda (2008a) aus einem Satz von Fassadenbildern a priori Informationen bezüglich der geometrischen Abmessungen und der Anordnung von Fenstern. Verteilungsfunktionen werden berechnet und zur Stützung des stochastischen Modellierungsprozesses genutzt. Andere Ansätze versuchen, aus Bildern - zum Teil auch aus LiDAR-Daten - prozedurale Regeln abzuleiten, greifen dabei jedoch auf halbautomatische Methoden zurück (Müller et al., 2007; van Gool et al., 2007; Hohmann et al., 2009). Dasselbe gilt für Aliaga et al. (2007). Sie präsentieren ein interaktives System für die Erzeugung neuer Gebäude im Stil vorhandener Bauten. Auch die Abänderung bestehender Gebäude ist möglich. Zu Beginn unterteilt der Anwender ein Gebäude manuell in dessen Hauptbestandteile. Auf Basis dieser Segmentierung kann anschließend automatisch eine Grammatik abgeleitet werden, welche wiederkehrende Fassadenelemente und -strukturen erfasst. Die Grammatik legt damit den architektonischen Stil fest, in dem sich neue Gebäude generieren beziehungsweise alte modifizieren lassen. Mit der automatischen Erzeugung individueller Grammatiken entfällt die manuelle Vordefinition von Regeln. Ein wesentlicher Bestandteil des Ableitungsprozesses, die Fassadeninterpretation, muss jedoch weiterhin manuell ausgeführt werden. Dehbi et al. (2009) setzen Konzepte der Induktiven Logischen Programmierung (ILP) für das Lernen von Grammatikregeln und semantischen Modellen ein, wenden diese bislang aber nur auf Treppen an. Fehlerbehaftete Beobachtungsdaten werden noch nicht herangezogen.

1.3 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Verfahrens zur Fassadenrekonstruktion, das zum einen vollautomatisch abläuft und zum anderen möglichst unabhängig von Qualität und Verfügbarkeit beobachteter Sensordaten ist. 3D-Fassadenstrukturen werden sowohl geometrisch als auch sinnerfassend modelliert. Damit liefert die vorliegende Arbeit einen Beitrag, um der Realisierung voll interpretierter und detaillierter 3D-Stadtmodelle auf effiziente Weise näher zu kommen.

Mit Ausnahme von wenigen von Hand modellierten Landmarken sind Gebäude in derzeit verfügbaren 3D-Stadtmodellen in der Regel durch grobe, teilweise mit Dachstrukturen versehene Modelle repräsentiert. Deren ebene Fassadenflächen sollen durch Elemente wie Fenster, Türen, Erker oder Balkone verfeinert werden, so dass sich detaillierte Fassadenmodelle ergeben. Die hierzu notwendige Strukturinformation ist aus terrestrisch erfassten LiDAR-Punktwolken automatisch zu extrahieren. Im Gegensatz zu bildbasierten Methoden, die aus mehreren Aufnahmen zunächst aufwendig 3D-Punkte ableiten müssen, besitzt Laserscanning den Vorteil, unmittelbar dreidimensionale Koordinaten bereitzustellen. Speziell in Fassadenbereichen lassen sich LiDAR-Punktwolken relativ einfach geometrisch und semantisch interpretieren und als explizite 3D-Geometrien zu bestehenden Fassaden hinzufügen. Bilder werden allenfalls zusätzlich in den Rekonstruktionsprozess miteinbezogen, um den geometrischen Detailgrad der erzeugten Strukturen weiter zu erhöhen. Auf eine Texturierung der Fassaden, wie sie beispielsweise Pu und Vosselman (2009a) vornehmen, wird hier verzichtet.

Anders als bei luftgestützt erfassten LiDAR-Daten ist die Qualität terrestrisch aufgenommener Punktwolken bezüglich Genauigkeit, Dichte und Verfügbarkeit recht selten über den gesamten Datensatz hinweg konstant und damit schwer im Vorfeld abzuschätzen. Ungünstige Aufnahmeconfigurationen, die auf Einschränkungen in der Wahl der Aufnahmepositionen, auf Sichthindernisse oder schräge Blickwinkel zurückzuführen sind, können beispielsweise zu deutlichen Schwankungen der Punktdichte am Objekt führen. Um auch in Bereichen mit schlechten und lückenhaften Sensordaten realistische Fassadenstrukturen erzeugen zu können, muss das zu entwickelnde Verfahren zur Fassadenrekonstruktion robust sein und mit der unterschiedlichen Datenqualität zurechtkommen. Realisiert wird dies 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.

Abbildung 1.1 veranschaulicht die wesentlichen Stufen der in dieser Arbeit vorgestellten Fassadenrekonstruktion. Das Verfahren beginnt mit der Extraktion und Modellierung von Fassadenstrukturen aus 3D-LiDAR-Punktwolken (Abbildung 1.1, Stufe 1). Das Resultat ist ein Fassadenmodell mit geometrisch und semantisch interpretierten Fassadeneinbuchtungen und -vorsprüngen (Abbildung 1.1, 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 die Entwicklung eines Verfahrens, 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 1.1, 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. Das gesetzte Ziel einer vollautomatischen, von der Qualität der Beobachtungen möglichst unabhängigen Rekonstruktion geht somit über

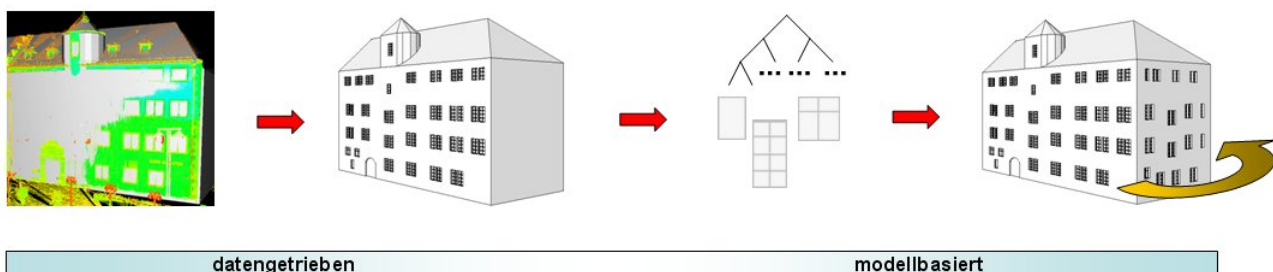


Abbildung 1.1: Wesentliche Stufen der Fassadenrekonstruktion (von links nach rechts): (1) grobes Gebäudemodell und LiDAR-Punktwolke; (2) Ergebnis der datengetriebenen Fassadenrekonstruktion; (3) abgeleitete Strukturen und Regeln für die Fassadengrammatik; (4) nach Anwendung der Grammatik vervollständigtes Fassadenmodell.

Ansätze wie beispielsweise den von Xiao et al. (2008) hinaus, die speziell in solchen Bereichen der manuellen Nachbearbeitung bedürfen. Im Gegensatz zu Forschungsarbeiten, die sich wie Cornelis et al. (2008) durch Ausnutzung mobiler Erfassungssysteme der effizienten Rekonstruktion straßenzugewandter Fassaden widmen, strebt das hier vorgestellte Verfahren die vollständige Modellierung von Gebäuden an, unabhängig von der Verfügbarkeit von Sensordaten (Abbildung 1.1, Stufe 4).

1.4 Gliederung

Die Gliederung der vorgelegten Arbeit orientiert sich im Wesentlichen an den Verfahrensschritten der Fassadenrekonstruktion. Die hierfür notwendigen Grundlagen werden in den Kapiteln 2 und 3 gelegt. Kapitel 2 richtet zunächst den Blick auf das zentrale Thema der grammatikbasierten Modellierung architektonischer Objekte. Es beginnt mit grundsätzlichen, in der Architektur geltenden Prinzipien, die den Einsatz von Grammatiken in Rekonstruktionsprozessen motivieren. Nach einer ausführlichen Darstellung wichtiger Vertreter von Grammatiken, die die Forschung in diesem Bereich geprägt und auch wesentliche Teile dieser Arbeit inspiriert haben, wird schließlich das hier entwickelte Konzept der Fassadengrammatik präsentiert.

Kapitel 3 bereitet den Boden für die datengetriebene Komponente der Fassadenrekonstruktion. Auf eine kurze Einführung in die 3D-Datenerfassung mittels Laserscansystemen folgt ein Überblick über gängige Methoden zur Registrierung von Datensätzen, die von verschiedenen Standpunkten aufgenommen wurden oder aus unterschiedlichen Sensoren stammen. Der in dieser Arbeit durchgeführte Registrierungsansatz wird im Anschluss beschrieben. Der verbleibende Teil des Kapitels widmet sich den wichtigsten Konstruktions- und Repräsentationsformen von 3D-Objekten im Allgemeinen beziehungsweise 3D-Gebäudemodellen im Speziellen.

In Kapitel 4 werden die einzelnen Schritte der hier entwickelten datengetriebenen Fassadenrekonstruktion ausführlich erläutert. Sie umfassen die geometrische und semantische Interpretation der Beobachtungsdaten, die der Verfeinerung bestehender grober Gebäudemodelle durch explizite 3D-Fassadenstrukturen vorausgeht. Das Potenzial des Verfahrens wird anhand von Datensätzen aus unterschiedlichen Erfassungssystemen demonstriert; eine Bewertung des Verfahrens wird vorgenommen.

Kapitel 5 beinhaltet die automatische Ableitung von Wissen über gebäudespezifische Fassadeneigenschaften, wie es beispielsweise in den interpretierten Fassadenmodellen der datengetriebenen Rekonstruktion implizit enthalten ist. Auf Basis des extrahierten Modellwissens werden individuelle Fassadengrammatiken aufgebaut. Die einzelnen Schritte, die hierfür zu durchlaufen sind, werden detailliert dargelegt.

Der Einsatz der Fassadengrammatik ist Gegenstand des Kapitels 6. Beschrieben wird zunächst der Algorithmus, mit dem sich Hypothesen für Fassadenstrukturen erzeugen lassen. Mit der Vervollständigung und Verifikation bestehender Fassadenmodelle werden zudem weitere wichtige Anwendungsszenarien aufgezeigt.

Auf die Präsentation der Ergebnisse in Kapitel 7 folgt im selben Kapitel eine ausführliche Diskussion des Verfahrens. Den Abschluss der Arbeit bildet Kapitel 8, das wesentliche Aspekte und Erkenntnisse des vorgestellten Ansatzes zusammenfasst und darüber hinaus einen Ausblick auf weiterführende Themenfelder gibt.

2 Grammatik in der Architektur

Architektur unterliegt bestimmten Bedingungen und Prinzipien, die sich aus dem Ziel ergeben, bewohnbaren Raum zu schaffen unter der Berücksichtigung ästhetischer Gesichtspunkte. Dazu zählen funktionale Restriktionen wie etwa das Einhalten einer Mindesthöhe von Stockwerken und Türen sowie Vorgaben aus der Statik. Hinzu kommen topologische Relationen, die beispielsweise aus der typischen Aufteilung eines Gebäudes in Stockwerke und Räume entstehen. Geometrische und topologische Bedingungen fließen in gestalterische Entscheidungen ein und spiegeln sich im Entwurf des Bauwerks wider. Mitchell (1990) definiert Architektur als die Kunst der Unterteilung des Raums, beispielsweise in voll und leer, innen und außen, hell und dunkel. Nach diesem Verständnis beschreibt Architektur einen Prozess, der eine amorphe Welt in einen geordneten Zustand überführt. Die Strukturierung des Raums beziehungsweise das dem Bauwerk zugrunde liegende Konzept rückt in den Mittelpunkt. Der strukturelle Aufbau eines Gebäudes wird durch architektonische Gliederungen bestimmt. Gliederungsformen geben Einblick in die Konzeption des Gebäudes und erleichtern so das Verständnis des Bauwerks als Ergebnis eines Konstruktionsprozesses. Sie liefern gleichzeitig Ansatzpunkte für die Analyse von Gebäudekomponenten und deren Beziehungen untereinander.

Bestrebungen, logische Zusammenhänge und Gesetzmäßigkeiten zu erkennen und mathematisch auszudrücken, gibt es seit den 1960er Jahren (Alexander, 1964). Generell eignen sich geometrische Bedingungen, topologische Beziehungen zwischen einzelnen architektonischen Elementen oder allgemeine Gesetzmäßigkeiten der Ensemblebildung, um als Regeln mit formalen Mitteln beschrieben zu werden. Ein mächtiges Werkzeug hierfür stellen formale Grammatiken dar. Zunächst entwickelt, um Denkmuster und Schlussfolgerungen zu formalisieren, werden sie seit einiger Zeit erfolgreich eingesetzt, um geometrische Strukturen und Konstruktionsprozesse abzubilden. Entsprechende Grammatiken arbeiten nicht auf linearen Zeichenketten sondern auf zwei- oder dreidimensionalen Formen. Sie bilden somit eine eigene Klasse formaler Grammatiken und können unter dem Begriff der *Gestaltgrammatiken* zusammengefasst werden. Wichtige Vertreter stellen die Lindenmayer-Systeme (Prusinkiewicz und Lindenmayer, 1990), die Formengrammatik Stiny und Gips (1972), die Split-Grammatik (Wonka et al., 2003) und die CGA-Formengrammatik (Müller et al., 2006b) dar. Sie bauen größtenteils aufeinander auf und sind in zunehmendem Maß für die Anwendung der Gebäudemodellierung geeignet. Zur Kategorie der Gestaltgrammatiken gehört auch die in dieser Arbeit entwickelte Fassadengrammatik. Sie ist so konzipiert, dass sie sich aus realen Beobachtungsdaten automatisch ableiten lässt. Sie eignet sich für die Beschreibung und Modellierung unterschiedlichster Fassadenarchitekturen. Als Grundprimitive der Grammatik dienen geometrische Objekte wie Fenster, Türen oder Balkone.

In Abschnitt 2.1 werden einige grundlegende Gliederungsformen in der Architektur am Beispiel von Fassaden vorgestellt. Neben der Darstellung von Prinzipien, die bei der Wahrnehmung allgemeiner geometrischer Formen gelten, wird auf die besondere Bedeutung einzelner Gebäudekomponenten für das Erscheinungsbild der Fassaden hingewiesen. In den nachfolgenden Abschnitten werden maßgebliche Aspekte der genannten Grammatiken näher ausgeführt. Abschnitt 2.2 setzt sich zunächst mit der Bedeutung der Grammatik im allgemeinen Sinn auseinander und präzisiert anschließend den Begriff der formalen Grammatik, die Basis aller formalen Sprachen. Die Einteilung der Grammatiken in eine Hierarchie wird in Abschnitt 2.3 behandelt. Die bezüglich der Architekturmodellierung wichtige Klasse der Gestaltgrammatiken wird an Hand der L-Systeme (Abschnitt 2.4), der Formengrammatik (Abschnitt 2.5), der Split-Grammatik (Abschnitt 2.6) und der CGA-Formengrammatik (Abschnitt 2.7) beschrieben. Abschnitt 2.8 zeigt schließlich das für diese Arbeit entwickelte Konzept der Fassadengrammatik.

2.1 Prinzipien in der Architektur

Gebäude beziehungsweise Fassaden erscheinen in der Regel mehr oder weniger strukturiert. Verantwortlich hierfür sind architektonische Gliederungen, die den strukturellen Aufbau vorgeben. Nach Breitling (1982) zeichnet sich die architektonische Ordnung durch die Übereinanderlagerung mehrerer Gestaltungsebenen oder -stufen aus:

1. Die Baukörperdimensionen und die Grundaufteilung in Geschosse.
2. Die Achsenbildung und die Grobgliederung in Elemente erster Ordnung, zum Beispiel Erker, Risalite und Hauptgesimse.
3. Das Verhältnis von Wand zu Loch.
4. Die Architekturglieder zweiter Ordnung, zu denen unter anderem Fensterverdachungen, Gesimse, Friese und Bänder zwischen den Gliedern erster Ordnung gehören.
5. Die Elemente dritter Ordnung, zum Beispiel Profilierungen, Teilungen, Dekor.

Neben der Unterscheidung von Gestaltungsebenen sind weitere architektonische Gliederungen feststellbar, die einem Gebäude beziehungsweise einer Fassade zugrunde liegen. Typische Ausprägungen sind horizontal oder vertikal betonte Fassaden, wie sie in Abbildung 2.1 zu sehen sind. Die jeweils vorherrschende Ordnung entsteht, indem einzelne Grundelemente der Fassade als Teil einer übergeordneten, kohärenten Einheit aufgefasst werden.



Abbildung 2.1: Horizontal- und vertikalbetonte Fassadengliederungen: Zeppelin-Bau (a), Staatstheater Großes Haus (b).

Gruppierungen dieser Art sind das Ergebnis von Selektions- und Abstraktionsprozessen, die sich bei der Betrachtung geometrischer Formen abspielen. Sie unterliegen Prinzipien der visuellen Wahrnehmung, die von kulturellen Einflüssen oder Fragen des persönlichen Geschmacks weitestgehend unabhängig sind (von Meiss, 1990). Die Untersuchung von Gruppierungsphänomenen geht auf einen Zweig der Wahrnehmungspsychologie, die *Gestalttheorie*, zurück, die in den Zwanzigerjahren des letzten Jahrhunderts von Gestaltpsychologen der Berliner Schule begründet wurde (Wertheimer, 1923; Arnheim, 1974). Über umfangreiche empirische Studien wurden Kohärenzfaktoren identifiziert und als sogenannte *Gestaltgesetze* formuliert. Diese beschreiben, wie einzelne Elemente aufgrund bestimmter Relationen, hauptsächlich geometrischer oder topologischer Natur, als eine Einheit - eine Gestalt - erlebt werden. Eine Auflistung sämtlicher Gestaltgesetze würde in diesem Zusammenhang zu weit führen. Stattdessen wird im Folgenden der Fokus auf eine Auswahl von Gestaltgesetzen gerichtet, die speziell bei der Wahrnehmung von Fassaden von Bedeutung sind. Eine ausführliche Darstellung findet sich in Metzger (1975).

- **Gesetz der Nähe:** Nahe beieinander liegende Elemente werden als zusammengehörig wahrgenommen (Abbildung 2.2a).
- **Gesetz der Ähnlichkeit:** Ähnliche Elemente werden zusammengefasst (Abbildung 2.2b).
- **Gesetz der Kontinuität:** Elemente werden gruppiert, wenn sie entlang einer „gedachten“ Linie oder Kurve angeordnet sind (Abbildung 2.2c).
- **Gesetz der Symmetrie:** Elemente, die symmetrisch zueinander angeordnet sind, werden als Einheit erfasst (Abbildung 2.2d).

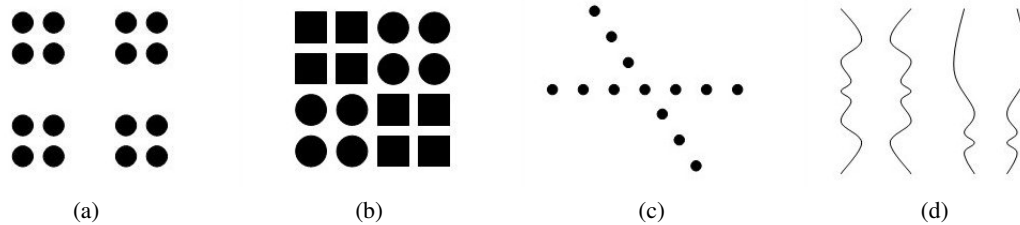


Abbildung 2.2: Gruppierungsphänomene einiger Gestaltgesetze: Gesetz der Nähe (a), Gesetz der Ähnlichkeit (b), Gesetz der Kontinuität (c), Gesetz der Symmetrie (d).

Aus den gruppierten Elementen lassen sich Informationen entnehmen, die die Summe der einzelnen Teile übersteigen, da auch die Beziehungen zwischen den Teilen implizit miteinfließen. Die Gruppierung auf Basis der Gestaltgesetze offenbart höherwertige Ordnungsmuster, die das Gebäude wesentlich bestimmen. Dazu gehören beispielsweise auch hierarchische Beziehungen innerhalb geometrischer Konfigurationen (von Meiss, 1990). Durch die selektive und abstrahierende Wahrnehmung von Fassadenkomponenten werden einzelne Elemente anderen gegenüber als dominant empfunden oder mehrere Elemente werden zu größeren, einfacher zu erkennenden Einheiten zusammengefasst.

Generell lassen sich Gebäudekomponenten in *funktionale* und *abstrakte* Elemente gliedern (Burden, 2000). Die funktionalen Komponenten sind gegenständliche Objekte wie Fenster, Türen, Wände und Dächer; zu den abstrakten Komponenten zählen unter anderem Form, Farbe und Textur. Von all diesen macht von Meiss (1990) das Fenster als Basiselement in der Architektur aus. Das Fenster gewinnt seine Bedeutung zum einen aus seiner Funktionalität, zum anderen ergeben sich durch das bewusste Aufbrechen geschlossener Wandbereiche gestalterische Möglichkeiten. Breitling (1982) bezeichnet das Fenster sogar als das Schlüsselement der Fassadengestalt. Fenster bestimmen das Erscheinungsbild einer Fassade in besonderem Maße. Die prägende Wirkung geht dabei von vielen einzelnen Merkmalen verschiedener Gliederungsebenen aus. Als wichtige Beispiele seien hier das Verhältnis zwischen geschlossener Mauerfläche und Maueröffnungen genannt, die Anordnung und Proportion der Fensteröffnungen sowie die Fenstergestaltung in Form von Umrahmung, Teilung oder Profilierung. Das *Design* einer Fassade ergibt sich durch die spezielle Ausprägung dieser Merkmale. Das Wechselspiel zwischen Wand und Lücke kann entweder zufällig erscheinen oder einem bestimmten Konzept folgen. Klar erkennbare Ordnungsmuster resultieren beispielsweise aus symmetrischen Anordnungen, der exakten Positionierung in Reihen und Spalten sowie der Einhaltung eines bestimmten Rhythmus bei der Aufeinanderfolge von Wand und Lücke. Die Homogenität eines Fassadendesigns kann durch Abweichungen von der Symmetrie, Anomalien im Muster oder durch Gliederungsachsen, welche unterschiedliche Interpretationen des zugrunde liegenden Konzepts zulassen, aufgehoben werden. Der Fassadenaufbau wird als zunehmend komplex wahrgenommen.

Die beschriebenen Merkmale, die ein Fassadendesign ausmachen, sind Indikatoren für die Zugehörigkeit zu einem bestimmten Architektur- oder Baustil. Nach Burden (2000) manifestiert sich ein *Stil* in der Ansammlung von Formen, die in verschiedenen Gebäuden einer historischen Epoche auftreten. Es wäre demnach möglich, einen Architekturstil auf Basis der Beobachtung mehrerer etwa zur gleichen Zeit erbauten Fassaden zu beschreiben. Eine vielfach akzeptierte Definition von Stil liefern Focillon (1948) und Ackermann (1962), die folgende Kriterien formulieren:

1. Eine Menge von Form-Elementen, das Repertoire (Alphabet).
2. Ein System von Beziehungen und Regeln (Syntax), die zwischen den einzelnen Elementen gelten.

Kennzeichnend für einen Stil ist folglich neben den verfügbaren Form-Elementen, dem sogenannten Fassadenrepertoire, die Art und Weise, in der die einzelnen Elemente durch bestimmte Anordnungen zueinander in Beziehung treten. Diese Beziehungen lassen sich formal über Regeln beschreiben. Das Fassadenrepertoire repräsentiert einen Vorrat von Grundformen, vergleichbar mit dem Zeichenvorrat eines Alphabets. Das System von Regeln, das den strukturellen Aufbau der Fassade festlegt, erinnert an die Syntax einer Grammatik. Die Abbildung eines

architektonischen Stils in eine Grammatik, deren wesentliche Komponenten Alphabet und Syntax darstellen, erscheint somit möglich; die Voraussetzungen für eine formale, grammatikbasierte Beschreibung und prozedurale Generierung von Fassadenmodellen in einem bestimmten architektonischen Stil sind gegeben.

2.2 Allgemeine und formale Definition von Grammatik

Der Begriff der Grammatik stammt aus dem Altgriechischen (grammatikē [technē]) und heißt wörtlich „Buchstabenlehre“. Er bezeichnet den korrekten Umgang mit Buchstaben und damit die Kunst des Lesens und Schreibens (Lausberg und Arens, 1990). In der heutigen Sprachtheorie wird die Grammatik als Mittel für eine systematische Sprachbeschreibung verstanden. Die Bedeutung der Grammatik geht daher weit über das Lesen und Schreiben hinaus. In Form eines Regelwerks legt die Grammatik fest, welche Sprachkonstruktionen erlaubt sind und welche nicht. Dadurch lassen sich grammatikalisch korrekte Texte von ungültigen trennen. Die Grammatik bestimmt damit den strukturellen Aufbau einer Sprache, die Syntax. Dagegen setzt sich die Semantik mit Bedeutung und Inhalt der Sprachkonstrukte auseinander. Sie ist nicht Teil der Grammatik.

Allgemein umfasst eine Sprache eine Menge von *Zeichenketten*, die aus den *Symbolen* eines beliebigen *Alphabets* aufgebaut sind (Hopcroft und Ullman, 1993). Unter einem *Symbol* versteht man eine abstrakte, nicht weiter zerlegbare Einheit. Buchstaben und Ziffern stellen Beispiele für häufig benutzte Symbole dar; aber auch Bilder, geometrische Formen oder Töne sind denkbar. Mit einem *Alphabet* ist eine endliche Menge von Symbolen gemeint. Eine *Zeichenkette*, oder auch *Wort*, ergibt sich als endliche Folge von Symbolen, die ohne Zwischenraum hintereinander geschrieben werden. Die Länge einer Zeichenkette entspricht der Anzahl der Symbole, aus denen sie aufgebaut ist. Eine Zeichenkette, die aus null Symbolen besteht, wird *leere Zeichenkette* genannt und mit ε bezeichnet. Für ihre Länge gilt entsprechend $|\varepsilon| = 0$. Werden zwei Zeichenketten, zum Beispiel w und x , ohne Zwischenraum aneinandergefügt, entsteht eine neue Zeichenkette wx , die sogenannte *Konkatenation*. Die leere Zeichenkette fungiert dabei als neutrales Element, das heißt $\varepsilon w = w\varepsilon = w$.

Die Menge aller Zeichenketten beziehungsweise Wörter, die sich durch Verkettung nicht notwendig verschiedener Symbole aus einem gegebenen Alphabet Σ bilden lassen, heißt *Kleenesche Hülle* oder auch *freies Monoid* über Σ und wird mit Σ^* bezeichnet (Appelrath und Ludewig, 1992). Die leere Zeichenkette ε ist ebenfalls ein Element dieser Menge. Soll ε explizit nicht enthalten sein, schreibt man Σ^+ . Definiert als eine beliebige Menge von Zeichenketten über einem Alphabet, stellt eine Sprache L eine Teilmenge des freien Monoids Σ^* dar: $L \subseteq \Sigma^*$. Es handelt sich dabei um eine sehr allgemeine Definition, die zum Beispiel auch abstrakte Sprachen wie die leere Menge \emptyset oder die aus dem leeren Element bestehende Menge $\{\varepsilon\}$ umfasst. Enthält eine Sprache alle über einem festen Alphabet Σ möglichen Zeichenketten, ist sie mit dem freien Monoid Σ^* identisch. Zur Veranschaulichung sei das Alphabet $\Sigma = \{0, 1\}$ gegeben. Das freie Monoid lautet $\Sigma^* = \{\varepsilon, 0, 1, 00, 01, 10, 11, 000, 001, \dots\}$. Die Menge aller Zehnerpotenzen $L = \{1, 10, 100, 1000, \dots\} \subset \Sigma^*$ stellt eine mögliche Sprache über dem Alphabet $\{0, 1\}$ dar.

Die Festlegung, welche Zeichenketten¹ zu einer Sprache gehören und welche nicht, geschieht über die Definition einer Syntax und ist Aufgabe der Grammatik. Diese beschreibt die Sprache, indem sie über eine endliche Anzahl von Regeln die Menge der erlaubten Zeichenketten bezüglich des freien Monoids einschränkt. Um den Bezug einer Sprache L zu ihrer Grammatik G zu verdeutlichen, schreibt man auch $L(G)$. Das Maß der Einschränkung gültiger Zeichenketten entscheidet über die Komplexität der Grammatik beziehungsweise der erzeugten Sprache. Entsprechend dieser Komplexität lassen sich die Grammatiken unterschiedlichen Klassen zuweisen. Die Chomsky-Hierarchie, benannt nach dem amerikanischen Linguisten Noam Chomsky, unterscheidet vier hierarchisch angeordnete Grammatiktypen (Abschnitt 2.3). Sie beginnt mit der allgemeinsten Form von Grammatiken, den Typ-0-Grammatiken, und endet mit den regulären Typ-3-Grammatiken. Die darstellbaren Sprachen werden dabei von Stufe zu Stufe immer mehr eingeschränkt und dadurch einfacher aber auch weniger mächtig.

¹In der Sprachtheorie wird für die Beschreibung natürlicher Sprachen oftmals der Begriff *Satz* als Synonym für Zeichenkette verwendet. Ein Satz steht dabei für eine endliche Folge von Wörtern. Die Menge aller Wörter wird als Vokabular Σ bezeichnet. Dieser Betrachtungsweise folgend ist eine Sprache definiert als beliebige Menge von Sätzen über einem gegebenem Vokabular (Heringer, 1972).

Nicht für alle Arten von Sprachen ist eine präzise Festlegung der Syntax möglich. Probleme ergeben sich bei natürlichen Sprachen wie zum Beispiel Deutsch oder Englisch. Diese sind nicht nur sehr umfangreich und komplex, sondern auch einem ständigen Wandel unterworfen. Neue Wörter und Sprachwendungen werden geprägt, Schreibweisen ändern sich. Wörter und Ausdrücke können zudem mehrdeutig sein. Die Syntax lässt sich damit nicht mehr exakt beschreiben. Für Anwendungen in der Informatik greift man daher auf künstliche, sogenannte formale Sprachen zurück. Darunter versteht man jene Sprachen, die eine konstruktive Definitionsvorschrift besitzen und sich über eine sogenannte *formale Grammatik* erzeugen lassen. Im Gegensatz zu natürlichen Sprachen besitzen sie ein konstantes endliches Grundvokabular sowie eine feste Syntax und Semantik (Appelrath und Ludewig, 1992). Sie lassen sich vollständig mathematisch darstellen und sind geeignet, um Informationen und Prozessabläufe auf eine computerverständliche Form abzubilden und rechnerintern verarbeiten zu lassen.

Eine formale Grammatik ist ein mathematisches Modell, über das sich eine Sprache erzeugen lässt. Die Grammatik bestimmt die Syntax der Sprache und legt fest, welche Zeichenketten beziehungsweise Wörter zu der Sprache gehören und welche nicht. Die Definition lautet (Appelrath und Ludewig, 1992):

Definition: Eine formale Grammatik G ist ein Viertupel $G(V, T, P, S)$, für das gilt:

- V : endliche, nichtleere Menge von Zeichen, den sogenannten *Nichtterminalsymbolen*
- T : endliche, nichtleere Menge von Zeichen, den sogenannten *Terminalsymbolen*, wobei $V \cap T = \emptyset$
- P : endliche Menge von Regeln der Form $(L \rightarrow R)$, den sogenannten *Produktionen*, wobei $L \in ((V \cup T)^* V (V \cup T)^*)$ und $R \in (V \cup T)^*$
- S : Startsymbol beziehungsweise *Axiom*, wobei $S \in V$.

Terminalsymbole, kurz Terminale, sind diejenigen Symbole, aus denen die Wörter der Sprache gebildet werden. Sie stellen die Grundbausteine der Sprache dar. Bei den Nichtterminalsymbolen, auch Nichtterminale oder Variablen genannt, handelt es sich um Symbole, die abstrakte Grammatikkomponenten darstellen. Zur Menge der Terminalsymbole sind sie disjunkt. Als syntaktische Variablen sind sie selbst nicht Teil der Sprache, werden aber zu deren Erzeugung verwendet. Über die Anwendung von Produktionen werden sie so lange sukzessive ersetzt, bis nur noch Terminale übrig bleiben. Die Produktionen P definieren Ersetzungsregeln $(L \rightarrow R)$, nach denen jeweils die linke Seite der Produktion, die Prämisse L , durch die rechte Seite der Produktion, die Konklusion R , substituiert wird. L und R stellen dabei Folgen von Nichtterminalen und Terminalen dar, wobei L mindestens ein Nichtterminal enthalten muss. Das Axiom ist ein Nichtterminalsymbol, das den Startpunkt der anzuwendenden Produktionen beschreibt. Aus ihm lassen sich alle gültigen Sprachkonstrukte ableiten.

Nachfolgende Definitionen und Ausführungen basieren auf der Bezeichnungskonvention von Hopcroft und Ullman (1993):

1. Kleinbuchstaben vom Beginn des Alphabets, zum Beispiel a, b, c , stehen für Terminale.
2. Großbuchstaben vom Beginn des Alphabets, zum Beispiel A, B, C , und S stehen für Nichtterminale. S bezeichnet das Startsymbol.
3. Großbuchstaben vom Ende des Alphabets, zum Beispiel X, Y, Z , stehen für Symbole, die sowohl Terminale als auch Nichtterminale sein können.
4. Kleinbuchstaben vom Ende des Alphabets, zum Beispiel u, v, w, \dots, z , stehen für Zeichenketten von Terminalen.
5. Griechische Kleinbuchstaben, zum Beispiel α, β, γ , stehen für Zeichenketten, die sowohl aus Terminalen als auch aus Nichtterminalen bestehen können.

Um die Sprache, die von einer Grammatik G erzeugt wird, formal definieren zu können, wird der Begriff der *Ableitung* eingeführt. Eine *Ableitung* bezeichnet eine Folge rekursiver Anwendungen von Produktionsregeln der Grammatik $G(V, T, P, S)$. Sei $A \rightarrow \beta$ eine Produktion aus P , und seien α und γ Zeichenketten in $(V \cup T)^*$, dann gilt $\alpha A \gamma \Rightarrow_G \alpha \beta \gamma$. Das Pfeilsymbol \Rightarrow_G beschreibt eine Relation zwischen Zeichenketten in $(V \cup T)^*$, die als

„direkte Ableitung“ oder „Ableitung in einem Schritt“ in der Grammatik G verstanden werden kann. Demzufolge lässt sich die Zeichenkette $\alpha\beta\gamma$ direkt aus $\alpha A \gamma$ durch Anwendung der Produktion $A \rightarrow \beta$ ableiten. Allgemein kann eine aus $n-1$ Schritten bestehende Ableitung $\alpha_1 \Rightarrow_G \alpha_2 \Rightarrow_G \dots \Rightarrow_G \alpha_n$ (mit $n \geq 1$) geschrieben werden als $\alpha_1 \Rightarrow_G^* \alpha_n$. Dabei sind $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ Zeichenketten aus $(V \cup T)^*$. Das Symbol \Rightarrow_G^* steht für die „Ableitung in null oder mehr Schritten“ und stellt die reflexiv transitive Hülle von \Rightarrow_G dar. α_n ist also in der Grammatik G aus α_1 über die Anwendung von null oder mehr Produktionen ableitbar. Die von der Grammatik G erzeugbare Sprache $L(G)$ lässt sich nun definieren als $\{w \mid w \in T^*, S \Rightarrow_G^* w\}$. Demnach ist eine Zeichenkette dann in der Sprache $L(G)$ enthalten, wenn sie ausschließlich aus Terminalen besteht und aus S abgeleitet werden kann. Eine Zeichenkette α aus $(V \cup T)^*$ wird auch als *Satzform* bezeichnet, wenn gilt $S \Rightarrow_G^* \alpha$.

Unterliegen die Produktionen bestimmten Beschränkungen, kann man eine Ableitung über einen sogenannten Ableitungsbaum, oder auch Parse-Baum, beschreiben. Ein Ableitungsbaum ist eine graphische Darstellung für ein Wort einer Sprache. Für Produktionen der Form $A \rightarrow \alpha$ ist ein Ableitungsbaum definiert als ein Baum mit folgenden Eigenschaften (Aho et al., 1992):

1. Die Markierung der Wurzel ist das Startsymbol.
2. Jeder innere Knoten ist mit einem Nichtterminal markiert.
3. Jedes Blatt ist mit einem Terminal oder der leeren Zeichenkette markiert.
4. Ist ein innerer Knoten mit dem Nichtterminal A markiert und besitzen die Nachfolger dieses Knotens von links nach rechts die Marken X_1, X_2, \dots, X_n , dann ist $A \rightarrow X_1, X_2, \dots, X_n$ eine Produktion.

Zur Veranschaulichung sei die Ableitung $S \Rightarrow_G AA \Rightarrow_G aAA \Rightarrow_G aaAA \Rightarrow_G aabA \Rightarrow_G aabb$ gegeben, erzeugt aus der Grammatik $G(\{S, A\}, \{a, b\}, P, S)$ mit $P = \{S \rightarrow AA, A \rightarrow aA, A \rightarrow b\}$. Der zugehörige Ableitungsbaum ist in Abbildung 2.3a zu sehen. Jede Anwendung einer Produktion resultiert in einem Teilbaum mit der Prämisse als Vorgängerknoten und den Elementen der Konklusion als Nachfolgerknoten. Informationen über die Reihenfolge der einzelnen Ableitungsschritte gehen dabei verloren. Von links nach rechts gelesen ergeben die Blätter des Ableitungsbaumes die sogenannte *Front* des Baumes. Sie stellt das Wort dar, das aus der Wurzel durch Anwendung der Produktionen abgeleitet wurde. Im Beispiel ist es das Wort $aabb$. Die Abbildungen 2.3b und 2.3c zeigen Unterbäume des Ableitungsbaumes. Ein Unterbaum umfasst einen bestimmten Knoten sowie all dessen Nachkommen, die verbindenden Kanten und Markierungen.

Nicht für alle Sprachen lassen sich die zugehörigen Wörter über einen Ableitungsbaum darstellen. Dies ist nur dann möglich, wenn die Produktionen der zugrunde liegenden Grammatik jeweils die Substitution eines Nichtterminals durch eine beliebige Zeichenkette aus $(V \cup T)^*$ beschreiben. Die Struktur der Produktionen entscheidet über die Mächtigkeit der erzeugten Sprachen. Je nach Art und Komplexität der Produktionsregeln lassen sich formale Grammatiken unterschiedlichen Klassen der Chomsky-Hierarchie zuordnen (Abschnitt 2.3).

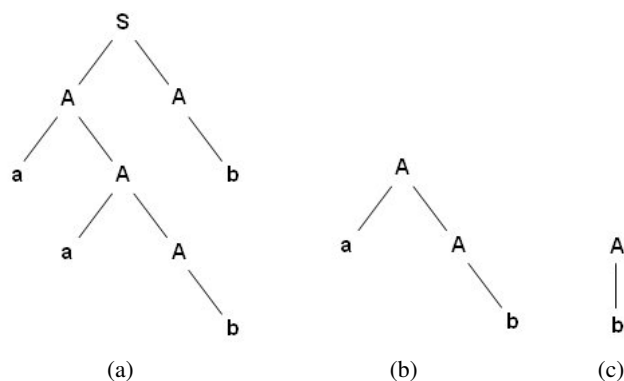


Abbildung 2.3: Beispielhafter Ableitungsbaum (a) und zugehörige Unterbäume (b) und (c).

2.3 Chomsky-Hierarchie

Die in Abschnitt 2.2 eingeführte Definition einer formalen Grammatik geht auf den Linguisten Noam Chomsky zurück. Auf Basis der nach ihm benannten Chomsky-Hierarchie lassen sich formale Grammatiken in Klassen unterschiedlicher Komplexität und Ausdruckskraft einteilen (Chomsky, 1959). Die Unterscheidung in vier verschiedene Grammatiktypen basiert dabei auf der Form ihrer Produktionsregeln. An diese werden bezüglich ihrer Struktur von Hierarchie zu Hierarchie immer mehr Bedingungen geknüpft. Die generative Mächtigkeit der Grammatiken, das heißt ihre Leistungsfähigkeit, nimmt dadurch kontinuierlich ab; die Menge der erzeugbaren Sprachen wird sukzessive eingeschränkt. Die Typ-0-Grammatiken (Abschnitt 2.3.1), auch unbeschränkte Grammatiken genannt, stellen die allgemeinste Form mathematisch darstellbarer Grammatiken dar. Mit ihnen können alle rekursiv aufzählbaren Sprachen beschrieben werden. Bei der Menge der rekursiv aufzählbaren Sprachen handelt es sich um die Obergrenze dessen, was man mit einer Grammatik erzeugen kann. Typ-1-Grammatiken (Abschnitt 2.3.2) produzieren die Menge der kontextsensitiven Sprachen, Typ-2-Grammatiken (Abschnitt 2.3.3) die der kontextfreien. Die regulären Sprachen sind die am meisten eingeschränkten und damit einfachsten Sprachen. Sie entstehen aus den Typ-3-Grammatiken (Abschnitt 2.3.4). Unter Berücksichtigung der jeweils zugrunde liegenden Grammatik lassen sich formale Sprachen folgendermaßen charakterisieren:

Definition: Ein formale Sprache L weist den Typ $i \in \{0, 1, 2, 3\}$ auf, wenn eine Grammatik $G(V, T, P, S) \in \text{Typ}_i$ mit $L = L(G)$ existiert. L ist damit ein Element der Sprachklasse \mathcal{L}_i .

Zwischen den einzelnen Sprachklassen besteht die echte Teilmengenbeziehung $\mathcal{L}_3 \subset \mathcal{L}_2 \subset \mathcal{L}_1 \subset \mathcal{L}_0$ (Hopcroft und Ullman, 1993). Demnach gilt: Jede reguläre Sprache ist kontextfrei, aber nicht jede kontextfreie Sprache ist regulär. Jede kontextfreie Sprache, die nicht die leere Zeichenkette enthält, ist kontextsensitiv, aber nicht jede kontextsensitive Sprache ist kontextfrei. Jede kontextsensitive Sprache ist rekursiv aufzählbar, aber nicht jede rekursiv aufzählbare Sprache ist kontextsensitiv.

Die Komplexität einer Sprache äußert sich in der Lösbarkeit des Entscheidungsproblems. In der Theoretischen Informatik versteht man unter dem Entscheidungsproblem die Frage nach einem Algorithmus, der die Gültigkeit einer Aussage bezüglich eines vorgegebenen mathematischen Formalismus überprüfen kann. Im Zusammenhang mit formalen Sprachen bedeutet dies die Fähigkeit entscheiden zu können, ob ein bestimmtes Wort zur Sprache gehört oder nicht (Claus und Schwill, 2006). Je komplexer die Sprache, desto schwieriger ist es, eine Aussage zu treffen. Formal ist die Entscheidbarkeit einer Sprache wie folgt festgelegt:

Definition: Eine Sprache L über dem Alphabet Σ heißt *entscheidbar*, wenn ihre charakteristische Funktion

$$\chi_L : \Sigma^* \rightarrow \{0, 1\}; w \mapsto \begin{cases} 1, & \text{falls } w \in L \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

für eine beliebige Zeichenkette w berechenbar ist.

Definition: Eine Sprache L über dem Alphabet Σ heißt *semi-entscheidbar*, wenn ihre partielle charakteristische Funktion

$$\chi'_L : \Sigma^* \rightarrow \{0, 1\}; w \mapsto \begin{cases} 1, & \text{falls } w \in L \\ \text{undefiniert,} & \text{sonst} \end{cases}$$

für eine beliebige Zeichenkette w berechenbar ist. L ist dann rekursiv aufzählbar.

Tabelle 2.1 zeigt die vier Grammatiktypen mit ihren wesentlichen Produktionseigenschaften und den zugehörigen Sprachen. Verwendet wird die in Abschnitt 2.2 eingeführte Notation für eine formale Grammatik $G(V, T, P, S)$. Erläuterungen folgen in den Abschnitten 2.3.1 bis 2.3.4.

Typ	Grammatik	Produktionsformen	Sprache	Entscheidbarkeit
0	unbeschränkt	$\alpha \rightarrow \beta$ $\alpha \in (T \cup V)^* V (T \cup V)^*$, $\beta \in (T \cup V)^*$, $\alpha \neq \varepsilon$	rekursiv aufzählbar	semi-entscheidbar
1	kontextsensitiv	$\alpha_1 A \alpha_2 \rightarrow \alpha_1 \beta \alpha_2$ $A \in V$, $\alpha_1, \alpha_2, \beta \in (T \cup V)^*$, $\beta \neq \varepsilon$ $S \rightarrow \varepsilon$ falls $\alpha \rightarrow \alpha_1 S \alpha_2 \notin P$, $\alpha \in (T \cup V)^*$	kontextsensitiv	entscheidbar in exponentieller Zeit
2	kontextfrei	$A \rightarrow \alpha$ $A \in V$, $\alpha \in (T \cup V)^*$	kontextfrei	entscheidbar in polynomieller Zeit
3	regulär	$A \rightarrow wB$ (rechts-linear) $A \rightarrow Bw$ (links-linear) $A \rightarrow w$ $A, B \in V$, $w \in T^*$	regulär	entscheidbar in linearer Zeit

Tabelle 2.1: Chomsky-Hierarchie.

2.3.1 Typ-0-Grammatik

Typ-0-Grammatiken entsprechen der in Abschnitt 2.2 gegebenen Definition einer formalen Grammatik. Sie bilden damit die allgemeinste Klasse der Chomsky-Grammatiken. Da die Produktionen der Form $\alpha \rightarrow \beta$ mit $\alpha \in (T \cup V)^* V (T \cup V)^*$, $\beta \in (T \cup V)^*$, $\alpha \neq \varepsilon$ keinerlei Einschränkungen unterliegen, spricht man auch von unbeschränkten Grammatiken oder allgemeinen Regelgrammatiken. α und β sind beliebige Zeichenketten von Grammatiksymbolen, wobei α nicht leer sein darf und mindestens ein Nichtterminal enthalten muss.

Mit Typ-0-Grammatiken lassen sich rekursiv aufzählbare Sprachen erzeugen. Es handelt sich hierbei um semi-entscheidbare Sprachen. Demnach können gültige Sprachkonstrukte in endlicher Zeit als solche erkannt werden. Für Zeichenketten, die nicht zur Sprache gehören, ist das Ergebnis der Gültigkeitsprüfung jedoch undefiniert. Eine effiziente Verarbeitung dieser Klasse von Sprachen ist somit nicht möglich. Daher spielen Typ-0-Grammatiken in der Praxis kaum eine Rolle.

2.3.2 Typ-1-Grammatik

Typ-1-Grammatiken, auch kontextsensitive Grammatiken genannt, gehen aus den Typ-0-Grammatiken hervor, indem die Menge möglicher Produktionen $\alpha \rightarrow \beta$ durch die Forderung $|\alpha| \leq |\beta|$ eingeschränkt wird. Die Zeichenkette der Konklusion muss folglich mindestens so lang sein wie die der Prämisse. Entsprechende Produktionen besitzen die Form $\alpha_1 A \alpha_2 \rightarrow \alpha_1 \beta \alpha_2$ mit $A \in V$, $\alpha_1, \alpha_2, \beta \in (T \cup V)^*$, $\beta \neq \varepsilon$. Die Substitution des Nichtterminals A durch die nicht leere Zeichenkette β kann nur im Kontext $\alpha_1 \cdots \alpha_2$ erfolgen. Dadurch wird Kontextsensitivität erreicht. Die Menge der erlaubten Produktionen kann zusätzlich die Regel $S \rightarrow \varepsilon$ enthalten, falls das Axiom S niemals Element einer Konklusion ist.

Typ-1-Grammatiken erzeugen die kontextsensitiven Sprachen. Diese sind weniger komplex als die übergeordnete Menge der rekursiv aufzählbaren Sprachen. Ob eine Zeichenkette zur Sprache gehört oder nicht, kann nun für beliebige Zeichenketten mit ja oder nein beantwortet werden. Der Zeitbedarf ($\mathcal{O}(d^n)$, $d > 1$) verhält sich dabei exponentiell zur Länge n der Zeichenkette. Kontextsensitive Sprachen sind also entscheidbar, wenngleich sie ebenso wie die rekursiv aufzählbaren Sprachen aufgrund ihrer hohen Komplexität nicht von praktischer Bedeutung sind.

2.3.3 Typ-2-Grammatik

Typ-2-Grammatiken bilden die Klasse der kontextfreien Grammatiken. Es handelt sich hierbei um Typ-1-Grammatiken, deren Produktionen die Form $A \rightarrow \alpha$ mit $A \in V$ und $\alpha \in (T \cup V)^*$ aufweisen. Die Prämisse besteht aus einem einzigen Nichtterminal; die Konklusion stellt eine beliebige (auch leere) Zeichenkette dar. Die Substitutionen werden somit ohne Beachtung des Kontexts, in dem das zu ersetzende Nichtterminal steht, durchgeführt. Ableitungen in kontextfreien Grammatiken können stets als Ableitungsbäume der in 2.2 definierten Form dargestellt werden (Claus und Schwill, 2006).

Mit Typ-2-Grammatiken lassen sich kontextfreie Sprachen beschreiben. Ihre Komplexität ist so weit eingeschränkt, dass das Entscheidungsproblem für beliebige Zeichenketten der Länge n in polynomialer Zeit ($\mathcal{O}(n^k)$, $k \geq 1$) gelöst werden kann. Sie erlauben eine effiziente Sprachverarbeitung und sind somit von großer praktischer Bedeutung. Zum Beispiel lassen sich kontextfreie Sprachen zur Beschreibung korrekt geklammerter arithmetischer Ausdrücke nutzen. Sie bilden zudem die theoretische Grundlage für die Definition von Programmiersprachen, reichen jedoch für eine vollständige Beschreibung der Syntax nicht aus. Um beispielsweise zu erzwingen, dass jede Variable deklariert sein muss, wäre eine kontextsensitive Grammatik notwendig. Die damit verbundene Menge von Produktionen würde dadurch aber so umfangreich, dass man in der Praxis auf kontextfreie Grammatiken zurückgreift und die zusätzlichen syntaktischen Bedingungen in der Umgangssprache definiert.

2.3.4 Typ-3-Grammatik

Typ-3-Grammatiken, auch als reguläre Grammatiken bekannt, gehen aus den kontextfreien Grammatiken durch eine weitere Einschränkung der Konklusion hervor. Diese besteht aus einer (eventuell leeren) Zeichenkette von Terminalen $w \in T^*$ und maximal einem Nichtterminal $B \in V$. Je nachdem, ob sich das Nichtterminal rechts oder links der Zeichenkette von Terminalen befindet, spricht man von einer rechts- oder links-linearen Grammatik. Produktionen rechts-linearer Grammatiken weisen die Form $A \rightarrow wB$ oder $A \rightarrow w$ auf. Umgekehrt beinhalten links-lineare Grammatiken ausschließlich Produktionen der Form $A \rightarrow Bw$ oder $A \rightarrow w$. Die Ableitungen in regulären Grammatiken entsprechen binären Ableitungsbäumen.

Reguläre Grammatiken erzeugen reguläre Sprachen. Diese lassen sich einfach und schnell verarbeiten; das Entscheidungsproblem kann in linearer Zeit ($\mathcal{O}(n)$) gelöst werden. Häufig werden sogenannte reguläre Ausdrücke für die Realisierung mächtiger Suchfunktionen in Texten verwendet. Ein weiteres Einsatzgebiet ist die Spezifizierung der lexikalischen Struktur von Programmiersprachen. Gemeint sind beispielsweise Angaben über das Aussehen von Variablennamen oder die Kennzeichnung von Kommentaren. Für die Beschreibung der Programmiersprachen selbst sind die regulären Sprachen jedoch nicht mächtig genug.

2.4 Lindenmayer-Systeme

Im Jahre 1968 entwickelte Aristid Lindenmayer einen Formalismus zur Simulation von Wachstumsprozessen mehrzelliger Organismen. Motiviert durch die Selbstähnlichkeit von Pflanzen und die Einfachheit von Entwicklungsalgorithmen wurden mit den Lindenmayer-Systemen (L-Systemen) parallele Ersetzungssysteme geschaffen, die sehr eng mit der Idee formaler Grammatiken verknüpft sind. Produktionsregeln werden angewendet, um einzelne Elemente eines einfachen Initialobjekts durch kompliziertere Strukturen sukzessive zu überschreiben. Durch die rekursive Durchführung dieser Ersetzungen können komplexe Objekte wie etwa Pflanzen oder Fraktale modelliert werden. Fraktale bestehen aus mehreren verkleinerten Kopien von sich selbst und eignen sich daher hervorragend für eine Darstellung durch L-Systeme. Ein klassisches Beispiel stellt die Koch-Kurve dar. Zu ihrer Konstruktion ist lediglich eine einzige Produktionsregel notwendig: die Ersetzung einer geraden Linie der Länge n durch einen Polygonzug bestehend aus vier Streckenstücken der Länge $n/3$ (Abbildung 2.4(oben)). Angewendet auf ein gleichseitiges Dreieck entsteht nach einigen Iterationen die berühmte Schneeflockenkurve (Abbildung 2.4(unten)).

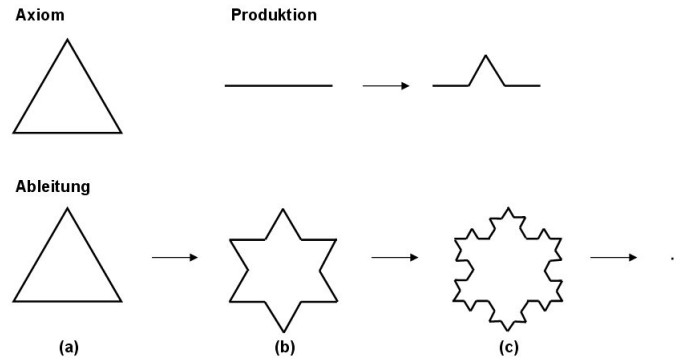


Abbildung 2.4: Schneeflockenkurve.

Bildhafte Darstellungen von Strukturen sind das Ergebnis zweier Komponenten: einer generativen und einer interpretativen. Der generative Teil umfasst das Ersetzungssystem, das eigentliche L-System. Dieses arbeitet ausschließlich auf Zeichenketten, erzeugt also keine expliziten Geometrieobjekte. Die graphische Umsetzung der generierten Zeichenketten erfolgt in der zweiten Komponente, dem interpretativen Prozess. Hier werden die Zeichenketten in geometrische Strukturen übersetzt. Abschnitt 2.4.1 beschreibt Prinzip und Ausprägungen der generativen L-Systeme. Ihre geometrische Interpretation wird in Abschnitt 2.4.2 behandelt. Abschnitt 2.4.3 zeigt schließlich Anwendungen der L-Systeme im Bereich der Stadtmodellierung.

2.4.1 Prinzip

L-Systeme sind formal als Ersetzungssysteme über Zeichenketten definiert. Die einfachste Klasse bilden dabei die deterministischen und kontextfreien L-Systeme. Prusinkiewicz und Lindenmayer (1990) beschreiben ein kontextfreies 0L-System wie folgt:

Definition: Ein kontextfreies 0L-System ist ein geordnetes Tripel $G(V, \omega, P)$, für das gilt:

- V : Alphabet des Systems, bestehend aus Variablen
- ω : Axiom, wobei $\omega \in V^+$
- P : endliche Menge von Produktionen, wobei $P \subset V \times V^*$

Die Zeichen des Alphabets werden als Variablen bezeichnet. Das Axiom ist ein nichtleeres Wort aus der Menge der Variablen. Eine Produktion $(a, \chi) \in P$ besitzt die Form $a \rightarrow \chi$, wobei das Zeichen a als *Vorgänger* (engl.: *predecessor*) und das Wort χ als *Nachfolger* (engl.: *successor*) bezeichnet wird. Es wird angenommen, dass es zu jedem Zeichen $a \in V$ mindestens ein Wort $\chi \in V^*$ gibt, so dass gilt $a \rightarrow \chi$. Ist für einen bestimmten Vorgänger $a \in V$ keine Produktion spezifiziert, geht man davon aus, dass die Identitätsproduktion $a \rightarrow a$ zur Menge der Produktionen P gehört. Ein 0L-System ist genau dann *deterministisch*, wenn für jedes Zeichen $a \in V$ genau ein Wort $\chi \in V^*$ und damit genau eine Produktion $a \rightarrow \chi$ existiert. Deterministische und kontextfreie Systeme werden als D0L-Systeme abgekürzt.

Der Ableitungsprozess ist folgendermaßen definiert: Sei $\mu = a_1 \dots a_m$ ein beliebiges Wort über V . Das Wort $\nu = \chi_1 \dots \chi_m \in V^*$ ist genau dann eine *direkte Ableitung* von μ , bezeichnet mit $\mu \Rightarrow \nu$, wenn $a_i \rightarrow \chi_i$ für alle $i = 1, \dots, m$. Das Wort ν ist aus G durch eine Ableitung der Länge n entstanden, wenn eine Folge einzelner Ableitungsschritte existiert mit $\mu_0 \Rightarrow \mu_1 \Rightarrow \dots \Rightarrow \mu_n$, wobei $\mu_0 = \omega$ und $\mu_n = \nu$.

L-Systeme stellen eine spezialisierte formale Grammatik dar. Ein wesentlicher Unterschied zu den Chomsky-Grammatiken liegt in der Anwendung der Produktionsregeln. Während bei Chomsky die Produktionen sequentiell abgearbeitet werden, geschieht dies in L-Systemen parallel; die Zeichen eines Wortes werden gleichzeitig ersetzt. Diese Vorgehensweise ist biologisch motiviert und ahmt zelluläre Wachstumsprozesse nach. Ein weiterer

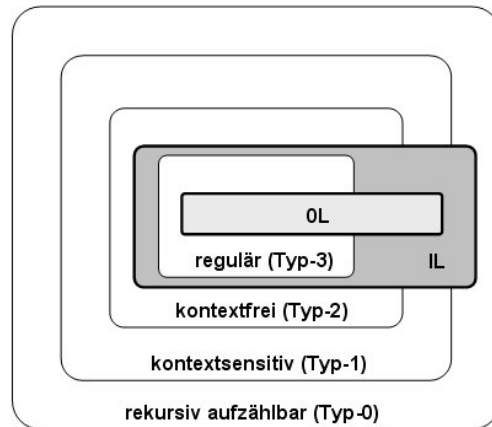


Abbildung 2.5: Einordnung von L-Systemen in die Chomsky-Hierarchie (nach Prusinkiewicz und Lindenmayer (1990)).

Unterschied ergibt sich daraus, dass bei L-Systemen nicht zwischen Terminalen und Nichtterminalen differenziert wird. Alle auftretenden Symbole können als Variablen verstanden und als solche substituiert werden. Das Ende eines Ableitungsprozesses tritt daher nicht wie bei Chomsky-Grammatiken nach vollständiger Elimination aller Nichtterminale ein, sondern wird durch eine vorgegebene Anzahl von Ableitungsschritten bestimmt.

Ähnlich wie bei Chomsky-Hierarchien können auch bei Lindenmayer-Systemen die Produktionen unterschiedlich komplex sein. Prinzipiell gibt es neben den kontextfreien 0L-Systemen auch die Klasse der kontextsensitiven IL-Systeme. Mit $I \in \{1, 2\}$ wird angedeutet, ob es sich um ein- oder beidseitige Kontextsensitivität handelt. Abbildung 2.5 zeigt eine Einordnung der L-Systeme in die Chomsky-Hierarchie der formalen Sprachen (Prusinkiewicz und Lindenmayer, 1990). Danach lassen sich unter anderem folgende Aussagen treffen: Die 0L-Sprachen bilden eine echte Teilmenge der kontextsensitiven Chomsky-Sprachen (Lindenmayer und Rozenberg, 1972), jedoch existieren reguläre Sprachen, die keine 0L-Sprachen sind. Es gibt Sprachen, die von kontextfreien 0L-Systemen erzeugt werden können, nicht aber von kontextfreien Chomsky-Grammatiken. IL-Sprachen bilden eine echte Teilmenge der rekursiv aufzählbaren Sprachen, enthalten aber nicht alle kontextfreien Chomsky-Sprachen. Es gibt Sprachen, die von kontextsensitiven IL-Systemen generiert werden können, aber nicht von kontextsensitiven Chomsky-Grammatiken.

Neben den kontextfreien und den kontextsensitiven L-Systemen gibt es die stochastischen, parametrischen, umgebungssensitiven und offenen L-Systeme. Die Klasse der deterministischen und kontextfreien L-Systeme $G(V, \omega, P)$ mit dem Produktionsformat $a \rightarrow \chi$ wurde bereits zu Beginn des Abschnitts definiert. Die übrigen L-System-Typen werden im Folgenden beschrieben.

Stochastische L-Systeme

Bei den bisher eingeführten deterministischen 0L-Systemen sind die Ergebnisse, die erzeugten Wörter, vorhersehbar. Ein und dasselbe L-System liefert bei gleichem Axiom und gleicher Anzahl von Ableitungsschritten immer exakt dieselbe Zeichenkette. Dieser Determinismus kann durchbrochen werden, wenn der Formalismus eines gewöhnlichen 0L-Systems $G(V, \omega, P)$ um eine Zufallskomponente erweitert wird. Man spricht dann von stochastischen L-Systemen. Ein stochastisches 0L-System wird beschrieben über ein geordnetes Vier-tupel $G_\pi(V, \omega, P, \pi)$, wobei die Funktion π die Wahrscheinlichkeitsverteilung $\pi : P \rightarrow (0, 1]$ darstellt. Sie bildet die Menge der Produktionen auf die Menge der Produktionswahrscheinlichkeiten ab. Demnach sind verschiedene Produktionen $p_i \in P$ ($i = 1, \dots, m$) mit demselben Vorgänger $a \in V$ möglich, wenn jede der Produktionen p_i mit einer bestimmten Anwendungswahrscheinlichkeit $\pi(p_i)$ ausgestattet ist. Die Summe der Wahrscheinlichkeiten aller Regeln mit demselben Vorgänger muss dabei eins ergeben. Stochastische Produktionsregeln werden folgendermaßen notiert:

$$p_i : a \rightarrow \chi : \pi(p_i)$$

Kontextsensitive L-Systeme

Die Produktionen eines 0L-Systems werden unabhängig davon angewendet, in welchem Kontext der Vorgänger steht. Speziell für die Nachbildung von Pflanzenstrukturen kann es jedoch sinnvoll sein, den Vorgänger nicht isoliert zu betrachten, sondern zusätzlich dessen Nachbarn zu berücksichtigen. Auf diese Weise können Interaktionen zwischen Pflanzenkomponenten modelliert und die Wachstumsprozesse einzelner Pflanzenteile von ihrem unmittelbaren Umfeld abhängig gemacht werden. Die Kontextsensitivität eines 2L-Systems $G(V, \omega, P)$ wird durch Produktionen des Formats

$$\chi_l < a > \chi_r \rightarrow \chi$$

ausgedrückt. Der Vorgänger a kann nur dann durch den Nachfolger χ substituiert werden, wenn sein linker Kontext dem Wort χ_l und sein rechter Kontext dem Wort χ_r mit $\chi_l, \chi_r \in V^*$ entspricht. L-Systeme, die entweder nur den linken oder nur den rechten Kontext definieren, werden als 1L-Systeme bezeichnet. Ihre Regeln besitzen die Form $\chi_l < a \rightarrow \chi$ beziehungsweise $a > \chi_r \rightarrow \chi$. 0L-Systeme, 1L-Systeme und 2L-Systeme gehören zu der Oberklasse der IL-Systeme. Diese werden auch (k,l)-Systeme genannt, wobei k die Wortlänge des linken und l die Wortlänge des rechten Kontextes ist.

Parametrische L-Systeme

Gegenüber den bislang vorgestellten L-Systemen bieten die parametrischen L-Systeme die Erweiterung, dass jedes Symbol des Alphabets mit zusätzlichen Parametern verknüpft ist. Diese können innerhalb von Produktionen verändert werden und schaffen so flexiblere Modellierungsmöglichkeiten für geometrische Strukturen. Beispielsweise ist eine Linie nun nicht mehr darauf beschränkt, ein ganzzahliges Vielfaches einer bestimmten Basislänge zu sein, da sich ihre Länge über Parameter individuell beschreiben lässt. Analoges gilt für Winkel.

Parametrische L-Systeme arbeiten folglich nicht auf Buchstaben, sondern auf sogenannten *Modulen*. Ein Modul $A(a_1, a_2, \dots, a_n)$ besteht aus einem Buchstaben $A \in V$ und den ihm zugeordneten Parametern $a_1, a_2, \dots, a_n \in \mathbb{R}$. Neben den reellwertigen Parametern gibt es die formalen Parameter, die zur Spezifikation der Substitution benötigt werden. Auf diese Parameter lassen sich logische und arithmetische Operatoren anwenden, die dann in Form von Bedingungen und arithmetischen Ausdrücken in die Produktionen einfließen. Sei Σ die Menge aller formalen Parameter. Dann bezeichnet Σ^* die Gesamtheit aller endlichen Folgen über Σ ; $C(\Sigma)$ ist die Menge aller logischen Ausdrücke und $E(\Sigma)$ die Menge aller arithmetischen Ausdrücke über Σ . Ein parametrisches 0L-System ist somit definiert als ein Viertupel $G(V, \Sigma, \omega, P)$ mit Produktionen der Form

$$A : c \rightarrow X$$

bestehend aus einem Modul $A \in (V \times \Sigma^*)$, einer Bedingung $c \in C(\Sigma)$ und einem Nachfolger $X \in (V \times E(\Sigma)^*)^*$. Das Wort X beschreibt eine Folge von Modulen, deren Parameter aus arithmetischen Ausdrücken berechnet werden. Eine Regel kann angewendet werden, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind: Die Bezeichnung des zu ersetzenden Moduls stimmt mit dem Vorgänger der Produktion überein; die Anzahl der aktuellen Modulparameter ist gleich der Anzahl der formalen Parameter des Vorgängers in der Produktion; die Bedingung wird mit „wahr“ ausgewertet.

Parametrische L-Systeme können auch stochastisch oder kontextsensitiv sein. Für ein solches L-System $G(V, \Sigma, \omega, P, \pi)$ besitzt eine Produktion p_i das Format

$$p_i : X_l < A > X_r : c \rightarrow X : \pi(p_i)$$

mit dem Modul $A \in (V \times \Sigma^*)$, der Bedingung $c \in C(\Sigma)$, den Wörtern $X_l, X_r \in (V \times \Sigma^*)^*$ und $X \in (V \times E(\Sigma)^*)^*$ sowie der Wahrscheinlichkeitsverteilung $\pi : P \rightarrow (0, 1]$.

Umgebungssensitive L-Systeme

Mit umgebungssensitiven Systemen ist die Möglichkeit gegeben, Reaktionen eines Objektes auf seine Umwelt zu simulieren. So kann zum Beispiel modelliert werden, dass sich eine Pflanze dem Licht zuwendet oder während ihres Wachstums an Hindernisse stößt. Das Format der Produktionen entspricht dem der parametrischen L-Systeme, wobei die darin vorkommenden Wörter zusätzlich spezielle *Anfragemodule* enthalten können. Anfragemodule, geschrieben als $?A(a_1, a_2, \dots, a_n)$, enthalten Parameter, die vom aktuellen Zustand des modellierten Objekts bezüglich seiner Umgebung abhängen. Anders als bei normalen Modulen bleiben die Parameter von Anfragemodulen zunächst undefiniert und werden erst nach erfolgter Regelanwendung gesetzt (Müller, 2001).

Offene L-Systeme

Offene L-Systeme stellen eine Verallgemeinerung der umgebungssensitiven L-Systeme dar. Während letztere lediglich die Reaktion eines Objekts auf seine Umwelt modellieren können, ermöglichen offene L-Systeme eine beidseitige Kommunikation (Müller, 2001). Dies wird durch die Erweiterung der Anfragemodule zu Kommunikationsmodulen der Form $?E(x_1, x_2, \dots, x_n)$ erreicht. Nach Anwendung einer Produktion wird das generierte Wort von links beginnend nach Kommunikationsmodulen durchsucht. Sobald ein Kommunikationsmodul eingelesen ist, werden die aktuellen Parameter x_1, x_2, \dots, x_n als Anfrage an die Umgebung gesendet, die daraufhin in entsprechender Art und Weise reagiert. Umgekehrt gibt die Umgebung Antwortparameter y_1, y_2, \dots, y_n an das Kommunikationsmodul zurück und beeinflusst damit den Zustand des Objekts.

2.4.2 Geometrische Interpretation

Um die durch ein L-System generierten Wörter graphisch umsetzen zu können, müssen sie geometrisch interpretiert werden. Eine einfache und häufig eingesetzte Methode verwendet die aus LOGO-Programmen bekannte *Turtle-Geometrie*. Eine imaginäre Schildkröte (*engl.: turtle*) empfängt und befolgt Anweisungen, die deren Position und Richtung verändern. Eine Anweisung stellt dabei ein hergeleitetes Wort dar, welches in einen zurückzulegenden Pfad übersetzt wird. Werden die Bewegungen der Schildkröte aufgezeichnet, entsteht ein Linienmuster als graphische Interpretation der Eingabe. Position und Orientierung der Schildkröte werden beschrieben über das Tripel (x, y, α) mit den kartesischen Koordinaten x, y und dem Richtungswinkel α . Bekannt seien außerdem eine Schrittweite d und eine Winkeländerung δ . Die Bewegung der Schildkröte wird über folgende Befehle gesteuert:

- $F(d)$ Bewege die Schildkröte um einen Schritt der Länge d in Blickrichtung nach vorne und zeichne dabei eine Linie. Der neue Zustand der Schildkröte ist (x', y', α) , wobei $x' = x + d \cdot \cos \alpha$ und $y' = y + d \cdot \sin \alpha$.
- $f(d)$ Wie $F(d)$, aber zeichne dabei keine Linie.
- $+(\delta)$ Drehe die Schildkröte im Gegenuhrzeigersinn um den Winkel δ . Der neue Zustand der Schildkröte ist $(x, y, \alpha + \delta)$.
- $-(\delta)$ Drehe die Schildkröte im Uhrzeigersinn um den Winkel δ . Der neue Zustand der Schildkröte ist $(x, y, \alpha - \delta)$.

Zum Beispiel ist die in Abbildung 2.4 dargestellte Schneeflockenkurve die graphische Umsetzung des L-Systems $G(\{F, +, -\}, \omega, p)$ mit

$$\begin{aligned} \omega: & \quad F - -F - -F \\ p: & \quad F \rightarrow F + F - -F + F \end{aligned}$$

und $d = 1$, $\delta = 60^\circ$. Die gezeichneten Formen sind somit geometrische Interpretationen der Wörter $\mu_0 = F - -F - -F$ (Abbildung 2.4a), $\mu_1 = F + F - -F + F - -F + F - -F + F - -F + F - -F + F$ (Abbildung 2.4b), usw.

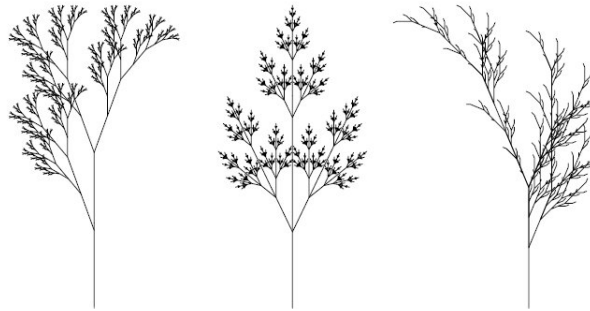


Abbildung 2.6: Beispiele pflanzenähnlicher Strukturen, erzeugt durch geklammerte L-Systeme (aus Prusinkiewicz und Lindenmayer (1990)).

Die bisher beschriebene Turtle-Geometrie ist auf die Nachbildung zweidimensionaler Strukturen beschränkt. Sie lässt sich jedoch ohne Weiteres auf drei Dimensionen ausdehnen (Prusinkiewicz und Lindenmayer, 1990). Der Zustand der Schildkröte wird dann festgelegt durch $(x, y, z, \mathbf{H}, \mathbf{L}, \mathbf{U})$, wobei x, y, z die Position und die Vektoren $\mathbf{H}, \mathbf{L}, \mathbf{U}$ die Orientierung der Schildkröte darstellen. $\mathbf{H}, \mathbf{L}, \mathbf{U}$ definieren ein lokales kartesisches Koordinatensystem: \mathbf{H} verläuft in Blickrichtung der Schildkröte, \mathbf{L} zeigt nach links, \mathbf{U} nach oben. Damit sich die Schildkröte in jede beliebige Lage drehen kann, wird das Alphabet $V = \{F, f, +, -\}$ der 2D-Turtle-Geometrie um die Symbole $\&$ und \wedge (Drehung um \mathbf{L} in positiver und negativer Richtung) sowie um \backslash und $/$ (Drehung um \mathbf{H} in positiver und negativer Richtung) erweitert. F und f stehen weiterhin für die Bewegung in Blickrichtung, $+$, $-$ für die Rotation um die \mathbf{U} -Achse.

Mit den bisher eingeführten Befehlen zur Steuerung der Schildkröte lassen sich sowohl im zweidimensionalen als auch im dreidimensionalen Raum ausschließlich zusammenhängende Linien erzeugen. Um jedoch auch verzweigende Strukturen wie Pflanzen nachbilden zu können, sind zwei weitere Symbole notwendig:

- [Lege den momentanen Zustand der Schildkröte auf den Stack (engl.: *push*).
-] Lese den neuen Zustand der Schildkröte vom Stack (engl.: *pop*). Zeichne dabei keine Linie.

L-Systeme, die diese Symbole verwenden, nennt man *verzweigend* oder *geklammert*. Abbildung 2.6 zeigt ein Beispiel für eine auf diese Weise generierte pflanzenähnliche Struktur.

2.4.3 Anwendungen in der Stadtmodellierung

L-Systeme bieten vielfältige Modelliermöglichkeiten, die zum Teil auch auf die Konstruktion architektonischer Objekte übertragen werden können. Beispielsweise nutzen Parish und Müller (2001) L-Systeme für die prozedurale Modellierung ganzer Städte. Zunächst generiert ein erweitertes L-System, dessen Verhalten hierarchisch kontrolliert werden kann, Straßennetze (Abbildung 2.7(links)). Das Straßennetz wird dabei auf einer globalen Ebene festgelegt. Denkbar sind unter anderem Rasterformen, radial angeordnete oder verzweigende Straßenstrukturen. In den Zwischenräumen der resultierenden Straßennetze werden in einem zweiten Schritt Unterteilungen vorgenommen und Grundrisse erzeugt. Die Gebäude entstehen schließlich als Extrusion der Grundrisse, wobei ihr Wachstum in die Höhe über ein weiteres stochastisches parametrisches L-System gesteuert wird. Diese Art der Modellierung eignet sich insbesondere für die Nachbildung von Hochhäusern. Abbildung 2.7(rechts) zeigt die zum Straßennetzwerk der Abbildung 2.7(links) gehörende virtuelle Stadt.

Die von Parish und Müller (2001) vorgestellte prozedurale Generierung von Straßen und Gebäuden spiegelt deren in der Realität stattfindenden Bauprozess unterschiedlich gut wider. Bei der Neuerschließung eines Baugebiets durch Straßen werden in der Regel zunächst die Hauptstraßen angelegt, gefolgt von den davon abgehenden Nebenstraßen. Die Straßen breiten sich im offenen Raum aus und bilden ein immer dichter werdendes Netzwerk. Dies kommt dem natürlichen Wachstum von Organismen nahe und kann daher über ein L-System sehr gut nachgebildet werden. Im Gegensatz dazu beruht die Konstruktion von Gebäuden eher auf der iterativen Unterteilung eines

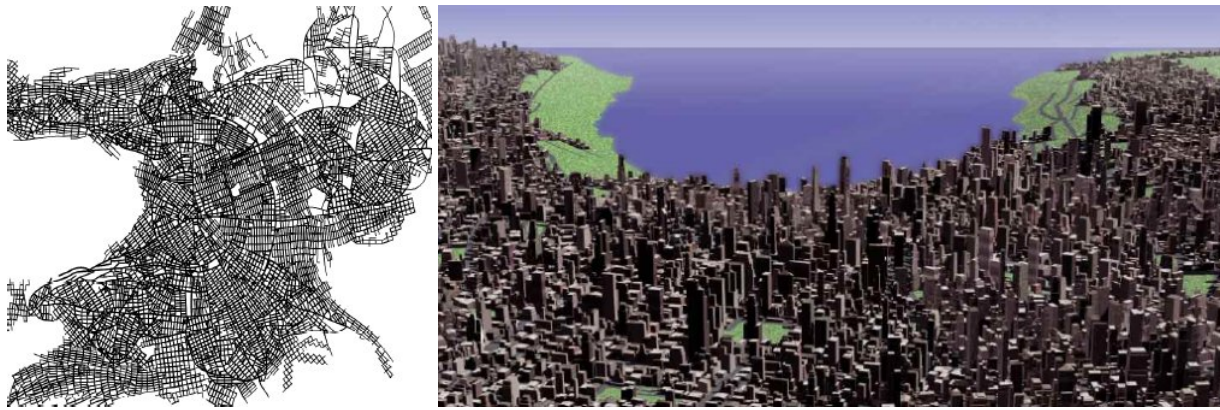


Abbildung 2.7: Prozedural generiertes Straßennetzwerk (links) und darauf aufgebautes virtuelles Stadtmodell (rechts) (aus Parish und Müller (2001)).

zur Verfügung stehenden Raums als auf einem Wachstumsprozess (Wonka et al., 2003). Darüber hinaus basieren Gebäudestrukturen auf geometrischen Bedingungen wie etwa Parallelität, Rechtwinkligkeit oder Koplanarität, die sich nicht effizient in ein L-System integrieren lassen. Selbst einfache Gebäudestile erfordern unverhältnismäßig lange Produktionsregeln.

Müller et al. (2006b) entwickeln daher eine spezielle CGA-Formengrammatik, die auf L-Systemen basiert aber zusätzlich noch Ideen der Formengrammatik und der Split-Grammatik miteinbezieht. Diese werden in den nachfolgenden Abschnitten vorgestellt.

2.5 Formengrammatik

Die Formengrammatik (*engl.: shape grammar*), erstmals präsentiert von Stiny und Gips (1972), ist speziell auf die Analyse und Konstruktion graphischer und architektonischer Objekte zugeschnitten. Im Gegensatz zu den Lindenmayer-Systemen arbeitet sie nicht auf Symbolen sondern auf sogenannten *Formen*. Eine Form ist definiert als eine endliche Anordnung von geraden Linien in einem kartesischen Koordinatensystem mit reellen Achsen und einer zugehörigen euklidischen Metrik (Stiny, 1980a). Dabei ist eine *Linie* $l = \{p_1, p_2\}$ festgelegt durch zwei verschiedene Punkte p_1 und p_2 , den Linienendpunkten. Zwei Formen sind identisch, sofern sie denselben Satz von Linien enthalten. Eine Form s_1 ist *Teilform* einer Form s_2 , wenn jede Linie von s_1 auch eine Linie von s_2 ist. Auf Formen lassen sich sowohl boolesche Operationen (Vereinigung (+), Schnitt (\bullet), Differenz (-)) als auch Transformationen (Translation, Rotation, Spiegelung, Skalierung) anwenden. Die Transformation τ einer Form s wird als $\tau(s)$ geschrieben.

Eine Formengrammatik spezifiziert Regeln, nach denen neue Formen gebildet werden können. Ihre Definition lautet (Stiny, 1980a):

Definition: Eine Formengrammatik G ist ein Viertupel $G(S, L, R, I)$, für das gilt:

- S : endliche Menge von Formen
- L : endliche Menge von Symbolen
- R : endliche Menge von Formenregeln beziehungsweise Produktionsregeln der Gestalt $(\alpha \rightarrow \beta)$ mit den Formen α und β , wobei $\alpha \in (S, L)^+$ und $\beta \in (S, L)^*$
- I : Startform beziehungsweise Axiom, wobei $I \in (S, L)^+$.

Die Formen der Menge S stellen die Grundbausteine der Grammatik dar. Um auf die einzelnen Punkte einer Form Bezug nehmen zu können, wird ihnen jeweils ein Symbol $A \in L$ zugeordnet. Die Notation ist (s, P) , wobei s die

Form und P eine Menge von mit Symbolen versehenen Punkten darstellen. Die Formenregeln oder Produktionen stellen Ersetzungsregeln dar. Eine Form links des Pfeilsymbols wird durch eine Form rechts des Pfeilsymbols substituiert. Weder die zu ersetzende Form der linken Seite noch die Startform I , die den Ausgangspunkt einer Folge von Produktionen darstellt, dürfen die leere Form (s_\emptyset, \emptyset) sein. Eine Produktion $\alpha \rightarrow \beta$ lässt sich dann auf eine Form γ anwenden, wenn es eine Transformation τ gibt, so dass $\tau(\alpha)$ eine Teilform von γ ist. Das Ergebnis der Produktion lautet $[\gamma - \tau(\alpha)] + \tau(\beta)$. Es entsteht aus der Substitution von $\tau(\alpha)$ durch $\tau(\beta)$, indem zunächst $\tau(\alpha)$ von γ abgezogen und die verbleibende Form dann mit $\tau(\beta)$ vereinigt wird.

Die Menge aller Formen, die sich durch eine Formengrammatik $G(S, L, R, I)$ erzeugen lassen, ist die Sprache $L(G)$. Die Formen entstehen aus der Startform I durch rekursive Anwendung von Produktionsregeln der Menge R und stellen Konfigurationen aus Formen beziehungsweise Teilformen der Menge S dar. Abbildung 2.8 zeigt ein Beispiel für eine Formengrammatik mit einem Axiom und einer Produktion (oben) und einer möglichen Sequenz von Regelanwendungen (unten). Die Produktion beschreibt eine Verschiebung, was in der Abbildung durch die Positionsänderung des Quadrats relativ zum Punktsymbol angedeutet werden soll.

Parametrische Formengrammatiken stellen Erweiterungen der Formengrammatiken dar. Sie arbeiten auf parametrisierten Formen; das sind Formen, bei denen die Koordinaten der Linienpunkte Variablen sind (Stiny, 1980a). Werden die Variablen einer parametrisierten Form s durch die Funktion g mit konkreten Werten belegt, erhält man die Form $g(s)$.

Stiny (1980b) definiert die Formengrammatik erstmals im dreidimensionalen Raum und legt damit die Grundlage für die Analyse von Architektur auf der Basis von Grammatiken. Mit Hilfe von Formengrammatiken lassen sich unterschiedliche Architekturstile erfassen und modellieren. Anwendungen beinhalten die automatische Modellierung von Gebäuden eines bestimmten Stils (Bekins und Aliaga, 2005) wie zum Beispiel die Buffalo Bungalows (Downing und Flemming, 1981), die Palladio-Villen (Stiny und Mitchell, 1978), die Prärie-Stil-Häuser (Koning und Eizenberg, 1981) oder die Siza-Wohngebäude in Malagueira (Duarte, 2003). Die Rekonstruktion von Queen-Anne-Häusern erfolgt über eine parametrische Formengrammatik (Flemming, 1987).

Die Anwendung einer Formengrammatik wird schnell sehr komplex. Während eines Ableitungsprozesses entstehen ständig neue Formen, die auf das Vorhandensein bestimmter Teilformen hin untersucht werden müssen. Dazu sind umfangreiche Methoden notwendig (Wonka et al., 2003). Eine Alternative sind Grammatiken, welche die Formen als symbolische Objekte behandeln (Stiny, 1982) und daher im Gegensatz zu Formengrammatiken keine Zuordnungsalgorithmen von Teilformen benötigen. Abschnitt 2.6 stellt mit der Split-Grammatik (Wonka et al., 2003) einen Vertreter dieser Art von Grammatiken vor.

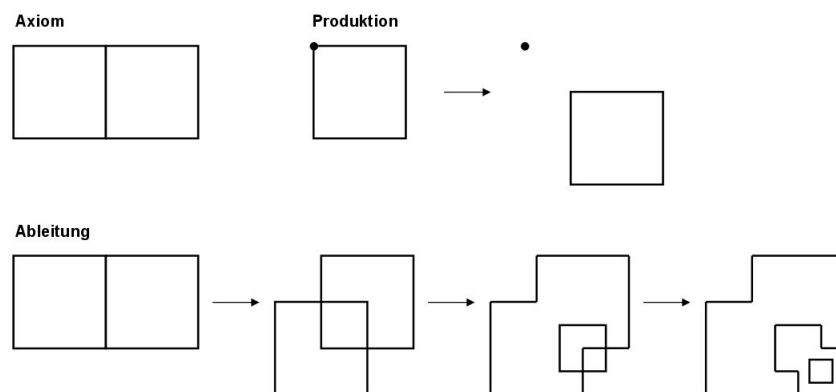


Abbildung 2.8: Einfache Formengrammatik mit Axiom und Produktionsregel (oben) sowie einer beispielhaften Ableitungsfolge (unten).

2.6 Split-Grammatik

Die Split-Grammatik (*engl.: split grammar*), eingeführt von Wonka et al. (2003), basiert auf der Idee der Formen-grammatik und eignet sich insbesondere für die Modellierung von 3D-Gebäuden. Sie arbeitet auf geometrischen Formen, den sogenannten *Grundformen* (*engl.: basic shapes*), denen Attribute, Parameter und Symbole zugeordnet sind. Die Formen selbst stellen geschlossene, konvexe 3D-Objekte dar wie zum Beispiel Quader, Zylinder oder Prismen. Die Spezialisierung auf die Generierung von Gebäuden erfolgt, indem die Vielfalt der erlaubten Ersetzungsregeln eingeschränkt wird. Dadurch wird zwar die Ausdruckskraft der Grammatik gemindert, gleichzeitig aber auch der Ableitungsprozess vereinfacht. Eine wesentliche Regel, welche den tatsächlichen Konstruktionsprozess von Gebäuden nachempfunden und gleichzeitig für die Namensgebung der Grammatik ausschlaggebend ist, ist die Split-Regel (*engl.: split rule*). Sie beschreibt die Unterteilung einer Form in mehrere Teile, die das Volumen der Ausgangsform ausfüllen. Die iterative Anwendung mehrerer Split-Regeln stellt die sukzessive Zerlegung einer Fassade in ihre strukturellen Grundelemente dar.

Die Split-Grammatik ist eine spezielle formale Grammatik und lässt sich analog zu Abschnitt 2.2 als Viertupel $G(T, V, R, I)$ schreiben. Unterschieden werden Terminal- von Nichtterminal-Formen. Sie gehören zur Menge aller Grundformen, die mit $B = \{f(b) | b \text{ ist Grundform, } f \in F\}$ bezeichnet wird, wobei F die Menge der Affintransformationen darstellt. Terminal-Formen $t \in T$ sind atomare Formen, die nicht weiter zerlegt oder ersetzt werden können. Sie repräsentieren beispielsweise Fensterrahmen, Simse oder Wandflächen. Im Gegensatz dazu lassen sich Nichtterminal-Formen $v \in V$ über die Anwendung von Produktionsregeln durch andere Formen substituieren. Der Ausgangspunkt aller Ersetzungen ist die Startform $I \in V$, das Axiom.

Ähnlich wie die Grundformen besitzen auch die Produktionen $r \in R$ Attribute, die während der Spezifizierung der Grammatik festgelegt werden. Sie bestimmen den architektonischen Stil des Gebäudemodells. Mit der *Split-* und der *Umwandlungs-Regel* (*engl.: conversion rule*) sind genau zwei Arten von Produktionen erlaubt. Die *Split-Regel* ist eine (unter Umständen kontextsensitive) Produktion der Form $(a \rightarrow b)$, wobei a eine zusammenhängende Teilmenge von Formen aus B ist. b enthält dieselben Elemente wie a mit Ausnahme desjenigen Elements, auf das der Split angewendet wird. Bei der *Umwandlungs-Regel* handelt es sich um eine (unter Umständen kontextsensitive) Produktion $(a \rightarrow b)$, welche eine Grundform in eine andere überführt. a ist eine zusammenhängende Teilmenge von Formen aus B , die eine Grundform enthält. Bis auf die zu ersetzende Grundform in a setzt sich b aus denselben Elementen wie a zusammen. Während bei einer Split-Regel die Formen in b dasselbe Volumen ausfüllen wie die Formen in a , muss dies bei einer Umwandlungs-Regel nicht notwendigerweise der Fall sein.

Abbildung 2.9(links) zeigt Beispiele für die Produktionen einer Split-Grammatik, Abbildung 2.9(rechts) enthält das Ergebnis der Ableitung. Eine Startform (START) wird zunächst in vier Fassadenelemente (F) unterteilt, die ihrerseits weiter in Fenster (W), Schlussstein-Elemente (KS) (*engl.: keystone*) und Wandbereiche segmentiert werden. Dabei repräsentieren weiße, mit Symbolen versehene Flächen Nichtterminal-Formen, graue Flächen sind Terminal-Formen.

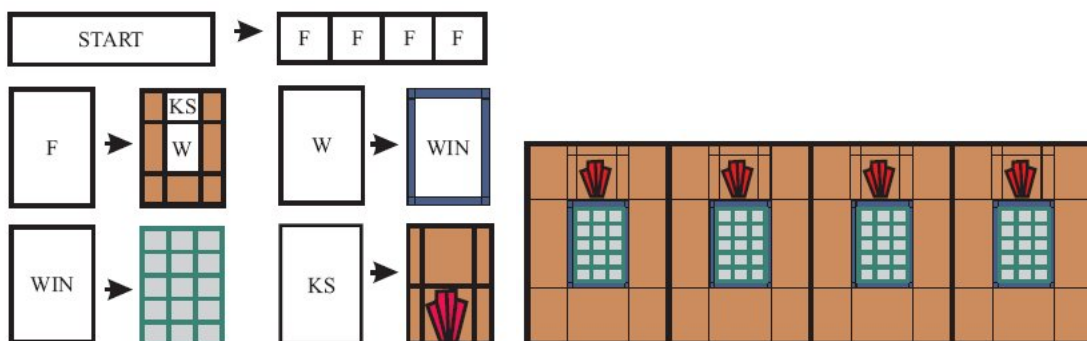


Abbildung 2.9: Einfache Split-Grammatik (links) und Ergebnis des Ableitungsprozesses (rechts) (aus (Wonka et al., 2003)).

Während eines Ableitungsprozesses stehen üblicherweise mehrere Produktionen für die Ersetzung einer bestimmten Form zur Verfügung, wodurch unterschiedliche Gebäude-Varianten erzeugt werden können. Auf welche Regel die Wahl schließlich fällt, wird durch eine Attributanpassung gesteuert. Das System vergleicht die Attribute der zu ersetzenden Form mit denen der verfügbaren Regeln, um aus diesen die geeignetste auszusuchen. Eine zusätzliche Kontrollgrammatik sorgt für die Weitergabe von Attributwerten einer Form an diejenigen Formen, die mit dieser in einer bestimmten räumlichen Beziehung (zum Beispiel alle Formen in einem Stockwerk) stehen. Grundsätzliche architektonische Prinzipien werden dadurch eingehalten.

Die Konzentration auf Split- und Umwandlungs-Regeln als einzig erlaubte Produktionen vereinfacht im Vergleich zu Formengrammatiken den Ableitungsprozess und ermöglicht eine effektive Modellierung von Gebäuden unterschiedlicher Stilarten. Die Palette reicht von griechischen und römischen Tempeln bis hin zu modernen Wohngebäuden und Hochhäusern (Wonka et al., 2003). Voraussetzung ist eine gewisse geometrische Regelmäßigkeit in den Fassadenstrukturen. Für die Generierung von Fassaden, die keine wiederkehrende Strukturen aufweisen, ist eine Split-Grammatik nicht geeignet. Probleme ergeben sich zudem, wenn komplexe geometrische Details und Konfigurationen vorliegen oder Strukturen zu modellieren sind, die sich über mehrere architektonische Einheiten erstrecken.

2.7 CGA-Formengrammatik

Die CGA-Formengrammatik (*engl.: Computer Graphics Architecture*) wurde von Müller et al. (2006b) speziell für die prozedurale Modellierung architektonischer Objekte entworfen. Der Modellierungsprozess folgt einer Grob-zu-Fein-Strategie, indem zunächst Gebäudeblöcke als grobe Volumenobjekte erzeugt und dann durch die geometrische Ausgestaltung der Fassaden sukzessive verfeinert werden. Die Grammatik verwendet sowohl Elemente der Split-Grammatik als auch der L-Systeme. So wird die Menge der erlaubten Produktionstypen einer Split-Grammatik (siehe Abschnitt 2.6) um die sogenannte Komponenten-Regel (*engl.: component split*) ergänzt, die beispielsweise für den Übergang von 3D-Körper auf 2D-Flächen notwendig ist. An die L-Systeme erinnert die Notation der Grammatik (siehe Abschnitt 2.4) sowie die Verwendung einer Transformations-Regel (*engl.: scope rule*), mit der sich Volumenobjekte hinzufügen, verschieben, rotieren und skalieren lassen.

Die Grundbausteine der Grammatik sind dreidimensionale Formen, die jeweils mit einem Symbol sowie geometrischen und numerischen Attributen versehen sind. Die geometrischen Attribute definieren dabei einen im 3D-Raum orientierten, die Form umschließenden Quader. Dieser wird beschrieben über die Position \mathbf{P} , drei orthogonale Vektoren $\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}$ zur Festlegung eines Koordinatensystems und einen Skalierungsvektor \mathbf{S} , der die Ausdehnung des Quaders in Richtung der Koordinatenachsen bestimmt.

Als Teilmenge der formalen Grammatiken lassen sich die CGA-Formengrammatiken analog zu Abschnitt 2.2 als Viertupel $G(V, T, P, S)$ schreiben. V stellt die Menge der Nichtterminal-Formen dar, die innerhalb von Produktionen durch andere Formen substituiert werden können. Eine besondere Nichtterminal-Form ist das Axiom S , die Startform einer Folge von Produktionsanwendungen. Die Terminal-Formen $t \in T$ lassen sich nicht weiter ersetzen. Sie werden repräsentiert durch den Befehl $I(ObjId)$, der eine Instanz des geometrischen Primitivs mit der Bezeichnung $ObjId$ einfügt. Die Produktionen $p \in P$ weisen die in Abschnitt 2.4.1 beschriebene Form einer parametrischen, stochastischen Regel auf. Ausgeschrieben lautet die Produktionsregel

$$id : \text{Vorgänger} : \text{Bedingung} \rightarrow \text{Nachfolger} : \text{Wahrscheinlichkeit}.$$

Zu den erlaubten Produktionstypen einer CGA-Formengrammatik gehören die *Komponenten-Regel*, die *Transformations-Regel* und die *Split-Regel*. Die *Komponenten-Regel* erlaubt den Zugriff auf einzelne Komponenten einer Form, beispielsweise Flächen, oder Kanten. Auf diese Weise kann der Übergang auf Formen geringerer Dimensionen (2D oder 1D) erfolgen. Mit der *Transformations-Regel* lassen sich Position, Orientierung und Größe einer Form verändern. Zulässig sind Translationen $\mathbf{T}(t_x, t_y, t_z)$, Rotationen $\mathbf{R}_x(\alpha)$, $\mathbf{R}_y(\beta)$, $\mathbf{R}_z(\gamma)$ und Skalierungen $\mathbf{S}(s_x, s_y, s_z)$.

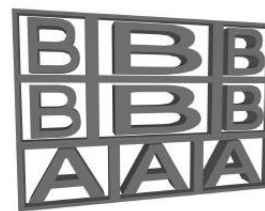
$$\begin{aligned}
 p_0 : facade &\rightarrow [(y, 1r, 1r, 1r) \{ floor1 | floor2 | floor2 \}] \\
 p_1 : floor1 &\rightarrow [(x, 1r, 1r, 1r) \{ winA | winA | winA \}] \\
 p_2 : floor2 &\rightarrow [(x, 1r, 2r, 1r) \{ winB | winB | winB \}] \\
 p_3 : winA &\rightarrow I(WindowObjectA) \\
 p_4 : winB &\rightarrow I(WindowObjectB)
 \end{aligned}$$


Abbildung 2.10: Einfache CGA-Formengrammatik (links) und Ergebnis des Ableitungsprozesses (rechts) (aus Haegler (2005)).

Ähnlich wie bei der Split-Grammatik definiert die *Split-Regel* die Unterteilung einer Form in mehrere andere Formen. Die Teilung wird über zwei Gruppen von Parametern präzisiert. Die erste Gruppe, in Abbildung 2.10 durch runde Klammern gekennzeichnet, definiert die Teilungsachse (x , y , oder z) sowie die Ausdehnung der Folgeelemente entlang dieser Achse. Relative Werte werden durch den Buchstaben r gekennzeichnet. Enthält die Split-Regel nur ein einziges Folgeelement, wird dieses so oft eingefügt, bis die Vorgängerform komplett ausgefüllt ist. Man spricht von einem sogenannten *Wiederholungs-Split* (engl.: *repeat split*). Die Parameter der zweiten Gruppe stellen die Nachfolgeelemente des Vorgängers dar. Sie werden in Abbildung 2.10 in geschweiften Klammern, jeweils durch „|“ getrennt, aufgeführt.

Zur Veranschaulichung sind in Abbildung 2.10(links) die Produktionen einer einfachen CGA-Formengrammatik gegeben. Die ersten drei Produktionen stellen Split-Regeln dar. p_0 unterteilt die Startform *facade* entlang der y -Achse in drei gleich große Teile, die durch die Nichtterminal-Formen, die Stockwerke *floor1*, *floor2* und *floor2*, eingenommen werden. Diese werden in p_1 und p_2 entlang der x -Achse unterteilt und durch Fensterelemente ersetzt. Deren geometrische Instanzen werden schließlich in p_3 und p_4 eingefügt. Die Anwendung der Produktionen führt auf das Ergebnis in Abbildung 2.10(rechts).

CGA-Formengrammatiken eignen sich für die prozedurale Generierung von Stadtmodellen in hohem Detailgrad. Die zugrunde liegenden Gebäudeformen sind dabei nicht auf einfache 3D-Primitive beschränkt, sondern können auch komplexe Konfigurationen aus mehreren Volumenobjekten sein. Beispiele liefern Müller et al. (2006b), die ganze Stadtteile in unterschiedlichen architektonischen Stilen automatisch modellieren. Dazu gehören von modernen Hochhäusern geprägte Großstadtviertel ebenso wie Vorstadtbereiche, in denen überwiegend Einfamilienhäuser auftreten. Haegler (2005) erzeugt auf der Basis von CGA-Formengrammatiken unter anderem venezianische Häuser sowie Wiener Geschäftsgebäude und Hotels. Möglich ist auch die Rekonstruktion historischer Städte und Anlagen wie etwa Pompeji (Müller et al., 2006b) oder der Maya-Siedlung in Xkipché (Müller et al., 2006a). Die Vorteile der CGA-Formengrammatiken gegenüber anderen Gestaltgrammatiken liegen in ihrer einfachen Anwendung und hohen Ausdruckskraft. Wie Split-Grammatiken ermöglichen sie die Kontrolle des Ableitungsprozesses, erleichtern jedoch zusätzlich durch ihre textbasierte Syntax die Lesbarkeit und das Verständnis der zugrunde liegenden Gestaltungsprinzipien. Die Geometrien der erzeugten Gebäude lassen sich im Gegensatz zu Formen- und Split-Grammatiken in Datenbanken exakt abspeichern und für weitere Renderingprozesse nutzen. Nachteilig ist jedoch hier wie auch bei all den zuvor vorgestellten Grammatiken der hohe manuelle Aufwand für die Bereitstellung der Grammatik. Für die Erzeugung realistischer Gebäudemodelle eines bestimmten Architekturstils ist eine Vielzahl von Produktionen nötig, deren Entwurf eine große Erfahrung des Modellierers voraussetzt. So besteht beispielsweise die Grammatik für die prozedurale Generierung der Stadt Pompeji aus 190 manuell entworfenen Regeln (Müller et al., 2006b).

2.8 Fassadengrammatik

Die in der vorliegenden Arbeit entwickelte Grammatik, bezeichnet als „Fassadengrammatik“, arbeitet auf bereits existierenden groben 3D-Gebäudemodellen, um deren ebene Fassadenflächen durch das prozedurale Hinzufügen expliziter 3D-Geometrien zu verfeinern. Ähnlich wie die CGA-Formengrammatik greift sie auf Elemente der Split-

Grammatik und der L-Systeme zurück. Die Fassadengrammatik ist so konzipiert, dass sowohl ihre Produktionsregeln als auch die Grundelemente, die über diese Regeln manipuliert werden, vollautomatisch aus realen Beobachtungsdaten abgeleitet werden können. Damit unterscheidet sie sich von den bisher beschriebenen Grammatiken, die auf die prozedurale Generierung hoch detaillierter 3D-Fassadenmodelle abzielen. Diese basieren auf einer Menge von Produktionen und 3D-Grundformen, die im Vorfeld manuell bereitgestellt werden müssen. Der Entwurf von Regeln und geometrischen Grundprimitiven fällt umso aufwendiger aus, je detailreicher und komplexer die darzustellenden Fassadenstrukturen sind. Während sich rasterförmige Anordnungen von Fassadenelementen durch relativ einfache Produktionen erzeugen lassen, erfordern schon kleine strukturelle Unregelmäßigkeiten umfangreiche Regeldefinitionen (Lipp et al., 2008).

Die für diese Arbeit entworfene Fassadengrammatik hingegen bietet den grundlegenden Vorteil, dass durch ihre Anwendung die arbeitsintensive manuelle Entwurfsphase überflüssig wird. Auf der Grundlage beobachteter 3D-Daten werden grundlegende Fassadenelemente und -anordnungen automatisch erkannt und in Form von Terminalen und Produktionsregeln gespeichert (siehe Kapitel 5). Um dabei der Vielfalt möglicher Fassadengeometrien gerecht zu werden, sind Aufbau und Syntax der Grammatikkomponenten so angelegt, dass sie auf reale Gegebenheiten flexibel reagieren und auch unregelmäßige Strukturen repräsentieren können. Der Detailgrad der modellierbaren Fassadenobjekte ist von der Auflösung und der Qualität der verfügbaren Beobachtungsdaten abhängig.

Die Fassadengrammatik lässt sich schreiben als Viertupel $G^{\text{Fassade}}(V, T, P, F)$ mit den Mengen der Nichtterminale V , der Terminale T , der Produktionsregeln P und dem Axiom F . Die Terminale und Nichtterminale stellen die Grundbausteine der Grammatik dar. Hinter ihnen verbergen sich Fassadenelemente, die eine explizite Geometrie aufweisen. Sie werden als *Kacheln* bezeichnet. Zwei verschiedene Arten von Kacheln treten auf: *Wandkacheln* und *Geometrikacheln*. Während es sich bei Wandkacheln um homogene ebene Fassadenbereiche handelt, beinhalten die Geometrikacheln sogenannte *Geometrieobjekte*. Unter einem Geometrieobjekt versteht man eine dreidimensionale Einheit, welche die ebene Fassadenfläche entweder als Einbuchtung, zum Beispiel in Form eines Fensters, oder als Gebäudevorsprung, etwa als Balkon oder Erker, unterbricht. Eine solche Einheit lässt sich geometrisch über eine Menge von 3D-Körpern beschreiben. Dazu gehört grundsätzlich ein quaderförmiger Körper, der die maximale Ausdehnung des Geometrieobjekts sowohl in der als auch senkrecht zur Fassadenebene festlegt. Weitere 3D-Körper liegen innerhalb dieses Quaders und modellieren das Design des betreffenden Geometrieobjekts im Detail. Im Falle eines Fensters mit Fensterkreuz würden diese inneren 3D-Körper die Streben des Fensterkreuzes darstellen. Die Koordinaten der Geometrieobjekt-Körper sind bezüglich eines lokalen Kachel-Koordinatensystems gegeben. Die xy -Ebene entspricht der Fassadenebene, wobei die x -Achse horizontal verläuft und nach rechts zeigt und die y -Achse entgegen der Lotrichtung nach oben gerichtet ist. Die z -Achse steht senkrecht auf der xy -Ebene und komplettiert das linkshändige kartesische Koordinatensystem. Formal sind Kachel und Geometrieobjekt wie folgt definiert:

$$\text{Kachel} = (\text{Geometrieobjekt}, \text{Abstand})$$

$$\text{Geometrieobjekt} = \{\text{Körper}_1, \text{Körper}_2, \dots, \text{Körper}_n\}$$

$$\text{Abstand} = \begin{cases} \text{Abstand}_{\text{vertikal}} & \text{falls } \text{Geometrieobjekt} \neq \emptyset \\ \text{Abstand}_{\text{horizontal}} & \text{falls } \text{Geometrieobjekt} = \emptyset \end{cases}$$

Jede Kachel besitzt zwei Attribute: ein Geometrieobjekt und einen Abstand. Handelt es sich beim Geometrieobjekt um eine nichtleere Menge von Körpern, liegt eine Geometrikachel vor. Das Attribut *Abstand* definiert dann die vertikale Distanz zwischen der Stockwerksebene und der Unterkante des Geometrieobjekts. Die Breite der Kachel ergibt sich aus dem minimal umschließenden Quader der zugehörigen Körper. Stellt das Geometrieobjekt eine leere Menge von 3D-Körpern dar, spricht man von einer Wandkachel. In diesem Fall repräsentiert das Attribut *Abstand* die horizontale Ausdehnung der Kachel. Abbildung 2.11 zeigt eine Wandkachel (links) und eine exemplarische Geometrikachel (rechts). Letztere beinhaltet ein Geometrieobjekt bestehend aus vier 3D-Körpern: ein großer Quader, der das Ausmaß des Fensterobjekts festlegt, und drei kleinere Quader zur Modellierung des Fensterkreuzes. Geometriekörper sind durch gelbe Flächen, Abstandsattribute durch rote Linien veranschaulicht.

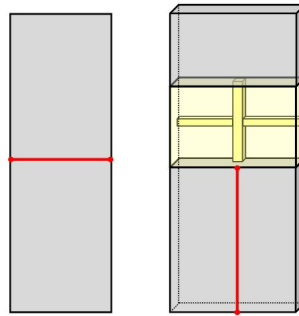


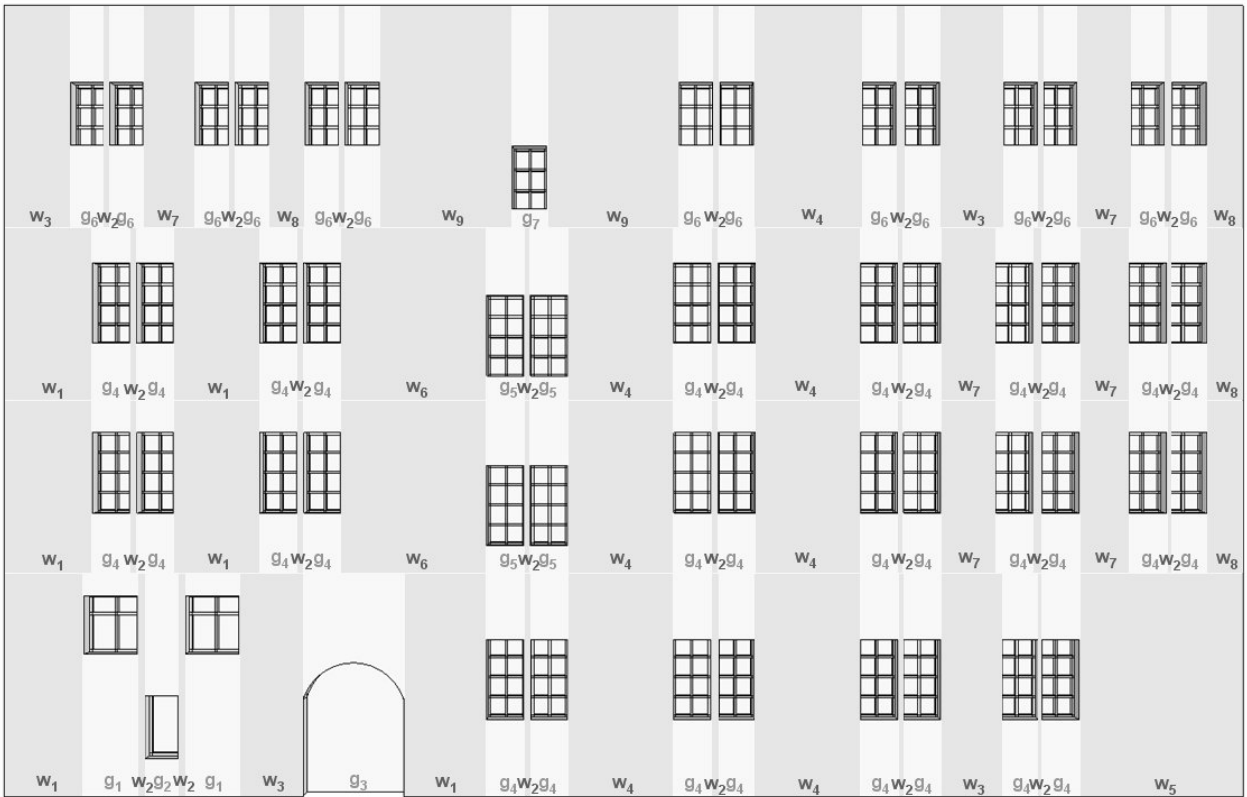
Abbildung 2.11: Wandkachel (links), Geometrikachel (rechts).

Generell ist jeder Kachel ein Symbol zugeordnet. Wandkacheln werden mit W für Nichtterminale und w_i für Terminale versehen; die analogen Bezeichnungen der Geometrikacheln sind G für Nichtterminale beziehungsweise g_i für Terminale. Diese Symbole besitzen weitere Attribute, welche neben geometrischen Eigenschaften der zugehörigen Kachel auch Informationen über deren Priorität beinhalten. Sie werden in Abschnitt 5.3 näher spezifiziert. Ein besonderes Nichtterminal stellt das Axiom F dar, welches den Startpunkt aller Produktionsanwendungen markiert. Geometrisch beschreibt es ein ebenes Fassadenpolygon, das über die Fassadengrammatik geometrisch verfeinert werden soll.

Bei den Produktionen P können im Wesentlichen zwei Arten von Regeln unterschieden werden: *Split-Regeln* und sogenannte *Instanziierungsregeln*. Mit den Split-Regeln wird die Fassadenfläche sukzessive in Kacheln unterteilt. Im Gegensatz zu den Split-Regeln der Split- oder der CGA-Formengrammatik sind diese hier jedoch so allgemein gehalten, dass mit ihnen problemlos auch unregelmäßige Fassadenstrukturen modelliert werden können. Als Beispiel sei die Produktion $W \rightarrow WGW$ genannt, welche die Unterteilung einer Wandkachel in die Folge „Wandkachel, Geometrikachel, Wandkachel“ bewirkt. Größtmögliche Flexibilität bezüglich der darstellbaren Strukturen wird dadurch erreicht, dass der Nachfolger dieser Produktion ausschließlich aus Nichtterminalen besteht und zudem eine rekursive Anwendung möglich ist. Die Anzahl der Rekursionen wird in Form von Bedingungen über die Attribute der beteiligten Symbole gesteuert (siehe Abschnitt 5.3.1). Der Übergang von Nichtterminalen zu Terminalen erfolgt schließlich über die automatisch abgeleiteten Instanziierungsregeln. Diese enthalten in der Zeichenkette ihres Nachfolgers jeweils mindestens ein Terminal und liefern somit die Grundlage, um geometrische Instanzen der zugehörigen Geometrieobjekte erzeugen zu können. Die Regeln besitzen jeweils eine bestimmte Wahrscheinlichkeit, sind parametrisch und teilweise kontextsensitiv. In der Notation, die bereits in Abschnitt 2.4.1 für die L-Systeme eingeführt wurde, lautet ihre allgemeine Form:

$$id : \text{linkerKontext} < \text{Vorgänger} > \text{rechterKontext} : \text{Bedingung} \rightarrow \text{Nachfolger} : \text{Wahrscheinlichkeit}. \quad (2.1)$$

Abbildung 2.12 zeigt für einen realen Datensatz die aus den beobachteten 3D-Daten automatisch generierten Instanziierungsregeln. Zur Vereinfachung sind hier nur Vorgänger und Nachfolger aufgeführt. Die detektierten Wand- und Geometrikacheln sind in unterschiedlichen Grautönen dargestellt und mit ihren jeweiligen Symbolen beschriftet. Das Beispiel repräsentiert die Alte Kanzlei in Stuttgart, ein historisches Gebäude, welches zwar wiederkehrende Fassadenelemente aufweist, gleichzeitig aber auch von strukturellen Unregelmäßigkeiten geprägt ist. Die Fenster sind nicht in einer durchgängigen Gitterstruktur angeordnet, sondern beispielsweise im Bereich des Treppenhauses gegenüber den Stockwerken versetzt. Dennoch lassen sich die beobachteten Fassadenstrukturen vollautomatisch in eine überschaubare Menge einfacher Produktionen überführen. Der Prozess der automatischen Ableitung einer Fassadengrammatik wird in Kapitel 5 behandelt. Die notwendigen Datengrundlagen werden im Folgenden beschrieben.



- $W \rightarrow w_i; i = 1, \dots, 8$
 $G \rightarrow g_i; i = 1, \dots, 7$
 $G \rightarrow S_i; i = 1, \dots, 10$
 $S_1 \rightarrow g_4 w_2 g_4$
 $S_2 \rightarrow g_5 w_2 g_5$
 $S_3 \rightarrow g_6 w_2 g_6$
 $S_4 \rightarrow S_1 w_7 S_1$
 $S_5 \rightarrow S_4 w_7 S_1$
 $S_6 \rightarrow S_3 w_7 S_3$
 $S_7 \rightarrow S_1 w_1 S_1$
 $S_8 \rightarrow S_2 w_4 S_1$
 $S_9 \rightarrow S_8 w_4 S_5$
 $S_{10} \rightarrow S_7 w_6 S_9$

Abbildung 2.12: Automatisch abgeleitete Instanzierungsregeln einer Fassadengrammatik für die Alte Kanzlei, Stuttgart.

3 Datengrundlagen

Für die Ableitung geometrischer Informationen aus Sensordaten zeichnet sich seit einigen Jahren ein Trend hin zu einer kombinierten Auswertung unterschiedlicher Sensoren ab. Ein größtmöglicher Nutzen entsteht dabei aus der Zusammenführung von Daten, die komplementäre Eigenschaften aufweisen, also sich ergänzende Informationen über die Objektszene liefern. Als komplementär gelten beispielsweise LiDAR- und Bilddaten. Laserscanning bietet den großen Vorteil, direkt 3D-Koordinaten zu liefern. Objekte lassen sich mit geringem Aufwand in relativ hoher Punktdichte erfassen. Das Verfahren eignet sich insbesondere für die Aufnahme kontinuierlicher Oberflächen. Problematisch ist hingegen die exakte Wiedergabe von 3D-Kanten, die aufgrund des vorgegebenen Abtastmusters oftmals nicht explizit durch 3D-Punkte repräsentiert sind und somit aus den umliegenden Punkten interpoliert werden müssen. Hier erweist sich die Photogrammetrie als günstiges Aufnahmeverfahren, da die Grauwertkanten in Bildern präzise gemessen werden können. Die im Vergleich zur Laserpunktwolke üblicherweise deutlich höhere geometrische Auflösung erlaubt zudem die Extraktion von kleinen und dünnen Strukturen, die in den 3D-Laserpunkten eventuell nicht zu finden sind. Die in Kapitel 4 vorgestellte Fassadenrekonstruktion macht sich die vorteilhaften Eigenschaften beider Erfassungsmethoden zunutze, indem es sowohl LiDAR-Punkte als auch Bilder berücksichtigt. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf der geometrischen und semantischen Interpretation der LiDAR-Daten. Die Integration von Bildern stellt eine Option dar, um den Detailgrad der resultierenden Fassadenmodelle in Fensterregionen zu erhöhen. Hierzu genügen einzelne, aus den Bildern extrahierte 3D-Kanten; eine Ableitung dichter 3D-Punktwolken aus Bildern wird nicht durchgeführt. In den folgenden Abschnitten werden die Grundlagen für die datengetriebene Fassadenrekonstruktion aus Kapitel 4 gelegt. Abschnitt 3.1 beschreibt zentrale Eigenschaften von Laserscansystemen, wobei die in dieser Arbeit verwendeten Sensoren im Vordergrund stehen. Ein wichtiger Vorverarbeitungsschritt für die gemeinsame Auswertung unterschiedlicher Sensordaten ist die Registrierung der einzelnen Datensätze. Geeignete Verfahren sind in Abschnitt 3.2 aufgeführt. Abschnitt 3.3 stellt unterschiedliche Möglichkeiten zur Repräsentation von 3D-Objekten vor und geht dabei unter anderem auf die sogenannte Zellenzerlegung ein, eine Art der Modellierung, auf der die in dieser Arbeit realisierte Fassadenrekonstruktion im Wesentlichen basiert.

3.1 3D-Datenerfassung mittels Laserscansystemen

Terrestrisches Laserscanning hat sich bereits seit einigen Jahren als geodätische Messtechnik etabliert. Zu den entscheidenden Faktoren zählen die flächendeckende, berührungslose Objekterfassung und die direkte Bereitstellung von 3D-Koordinaten. Die schnell voranschreitende Geräteentwicklung zeigt die breite Akzeptanz des Messverfahrens.

Die wesentlichen Bestandteile eines Laserscanners bilden die Entfernungsmesseinheit und die Ablenk- beziehungsweise Abtastvorrichtung. Übliche Strategien zur Entfernungsmessung sind das Impulsmessverfahren, auch Time-Of-Flight-Verfahren genannt, das Phasenvergleichsverfahren sowie optische Triangulation (Vosselman und Maas, 2010). Ihre jeweilige Stärke besteht in der Reichweite, der Distanzmessgenauigkeit oder der Geschwindigkeit, mit der der Scan durchgeführt werden kann (Ingensand und Schulz, 2005). So zeichnet sich beispielsweise das Impulsmessverfahren durch eine Reichweite von mehreren hundert Metern aus. Die Wiederholgenauigkeit liegt im unteren Zentimeterbereich. Die Phasenmessung ist geeignet, wenn Entfernungen unter 100m zu überbrücken sind. Ihr Vorteil liegt in der kurzen Aufnahmedauer und der hohen Genauigkeit in der Größenordnung einiger Millimeter. Genauigkeiten im Submillimeterbereich lassen sich mit der optischen Triangulation erzielen. Ihre Anwendung ist jedoch auf den Nahbereich (< 10m) beschränkt. Die Abtastvorrichtung basiert auf oszillierenden oder rotierenden

Spiegeln, die den Laserstrahl nach einem vorgegebenen Prinzip ablenken. Darüber hinaus kann die Richtung des Laserstrahls durch die Rotation des Scannerkopfes um eine seiner Achsen verändert werden. Grundsätzlich sind hier zwei Varianten zu unterscheiden: Wird der Laserstrahl insgesamt in nur eine Richtung abgelenkt, werden Profile aufgemessen; entsprechende Geräte werden auch als 2D-Scanner bezeichnet. Eine Auslenkung in verschiedene Richtungen ermöglicht hingegen eine flächenhafte Abtastung der Umgebung; analog spricht man von 3D-Scannern.

Terrestrisches Laserscanning kann sowohl statisch als auch kinematisch eingesetzt werden. Bei der statischen Aufnahme ist der Scanner während des gesamten Scanvorgangs auf einer Station fest montiert. Die erfassten 3D-Punkte beziehen sich alle auf ein gemeinsames lokales Koordinatensystem, das durch die Position und Orientierung des Scanners vorgegeben ist. Mittlerweile ist auf dem Markt eine Vielzahl von 3D-Scannern erhältlich. Dazu gehören unter anderem Scanner der LMS-Z Serie der Firma Riegler, Leica ScanStation 1 und 2 oder die Trimble-Scanner der GS/GX-Serie. Sie alle nutzen das Impulsmessverfahren. Phasenmessende Scanner sind zum Beispiel die der Faro-LS-Serie, der Leica HDS6000-Scanner oder der baugleiche IMAGER 5006 von Zoller und Fröhlich. Lemmens (2009) gibt eine umfassende und detaillierte Übersicht über aktuelle Produkte. Für die Erfassung der in dieser Arbeit vorgestellten Datensätze wurde der Leica HDS3000-Scanner mehrfach eingesetzt. Er arbeitet mit dem Impulsmessverfahren und einer Wellenlänge von 532 nm. Sein großes Sichtfeld von 360° horizontal und 270° vertikal verdankt er zum einen der Rotation des Scannerkopfes um die Stehachse und zum anderen zweier Sichtfenster, die in der Vertikalen Bereiche von -45 bis 32,5° beziehungsweise von 22,5 bis 97,5° abdecken (Abbildung 3.1a). Für die präzise Messung der horizontalen Auslenkung des 15 kg schweren Scannerkopfes steht ein Teilkreis für die Stehachse zur Verfügung. Die Entfernungsmessgenauigkeit beträgt laut Herstellerangaben 4 mm, die Genauigkeit einer Einzelpunktmessung beläuft sich auf 6 mm (Leica, 2006). Typische Aufnahmedistanzen liegen zwischen 50 und 100 m, Messungen bis über 200 m sind jedoch möglich.

Während bei der statischen Aufnahme eine hohe Genauigkeit und räumliche Auflösung im Vordergrund stehen, zeichnet sich die Punkterfassung im kinematischen Modus durch Effizienz und Schnelligkeit aus. Verwendet werden hier profilgebende 2D-Scanner. Eine flächenhafte Objektaufnahme wird dadurch realisiert, dass der Scanner nicht auf einem Standpunkt verharrt, sondern entlang einer Trajektorie bewegt wird. Als Folge der ständigen Änderung der äußeren Orientierung bezieht sich jeder aufgemessene 3D-Punkt auf ein eigenes Koordinatensystem. Um all diese Einzelsysteme in einem übergeordneten Bezugssystem vereinen zu können, müssen Position und Orientierung des Scanners während des gesamten Aufnahmeprozesses bestimmt werden. Hierfür geeignet sind Sensoren, die auf der GNSS-Technologie (engl.: *Global Navigation Satellite Systems*) beruhen, in Kombination mit inertialen Messeinheiten (IMU) (engl.: *Inertial Measurement Unit*). Die Objekterfassung im kinematischen Modus ist typisch für sogenannte *Mobile Mapping-Systeme*. Auf einer beweglichen Plattform sind hier sowohl Messinstrumente zur Bestimmung der gefahrenen Trajektorie, als auch Aufnahmesensoren und Einheiten zur Synchronisation beider Komponenten installiert. Eine Übersicht über Technologien und Messsysteme, die aktuell zur Georeferenzierung eingesetzt werden, sind in Petrie (2010) zu finden. Generell lassen sich Mobile Mapping-Systeme anhand ihrer Aufnahmesensorik klassifizieren. Entwicklungen wie zum Beispiel KiSS (Sternberg et al., 2001), MoSES (Gräfe, 2003), Visat (El-Sheimy, 1996) oder GPS-VAN (Grejner-Brzezinska und Toth, 2002), die in erster Linie auf Photogrammetrie basieren und Laserscanner entweder gar nicht oder höchstens als zusätzliche Sensoren nutzen, werden hier nicht betrachtet. Im Mittelpunkt des Interesses stehen vielmehr diejenigen Systeme, die die Objekterfassung vornehmlich auf Laserscanning stützen. Im Folgenden werden beispielhaft einige wichtige Vertreter dieser Kategorie aufgeführt. Ausführlichere Darstellungen enthalten Kutterer (2010) und Petrie (2010). Manandhar und Shibasaki (2002) beschreiben mit dem VLMS (engl.: *Vehicle-borne Laser Mapping System*) ein System mit drei vertikal ausgerichteten Zeilenscannern der Serie Sick LMS 200. Die Georeferenzierung basiert auf GPS/IMU-Einheiten und wird durch einen integrierten Wegmesser zusätzlich stabilisiert. Das von Glennie (2007) vorgestellte Mobile Mapping-System TITAN kann sowohl auf Land- als auch auf Wasserfahrzeugen eingerichtet werden. Es besteht neben GPS/IMU-Sensoren der Anbieter NovAtel und Honeywell aus einem im Profilmodus betriebenen 3D-Riegler-Scanner. Einen solchen nutzt auch das CityGRID-System (Haring, 2007), das seine Aufnahmesensorik jedoch zusätzlich noch um zwei digitale Kameras erweitert. Die Georeferenzierung basiert auf GPS-Messungen und Objektrauminformationen, beispielsweise in Form von Passpunkten. Das japanische Unternehmen Mitsubishi Electric Corporation bietet sein Mobile Mapping-System in drei Versionen an. Allen gemeinsam ist die Sensorkonfiguration zur Georeferenzierung. Sie setzt sich aus drei in einem Dreieck angeordneten GNSS-Empfänger (Trimble), einer

IMU-Komponente (Crossbow) sowie einem Wegmesser zusammen (Ishikawa et al., 2007). Die Systemvarianten MMS-A, MMS-S und MMS-X unterscheiden sich jeweils durch die Anzahl der integrierten Kameras (IMPERX) und Laserscanner des Typs LMS 291 (SICK). Der Mobile Mapper LYNX von Optech (Optech, 2007) zeichnet sich durch die hohe Geschwindigkeit aus, mit der ein Objekt erfasst werden kann. Verantwortlich hierfür sind Optech-Laserscanner, die mit einer Umdrehungsrate von 9000 Rotationen pro Minute eine räumliche Auflösung von 1 cm bei einer Fahrgeschwindigkeit von 100 km/h ermöglichen. GPS/IMU-Einheiten von Applanix und bis zu zwei Kameras komplettieren das System. Als Datenlieferanten für diese Arbeit dienen das StreetMapper- und das ROAMER-System. Sie werden daher im Folgenden näher vorgestellt.

Der StreetMapper (Kremer und Hunter, 2007) wurde in enger Zusammenarbeit von dem Unternehmen „3D Laser Mapping“ und der Firma IGI mbH als portables System entwickelt, das sich auf unterschiedlichen Fahrzeugen anbringen lässt. Zur Bestimmung der gefahrenen Trajektorie liefert IGI eine GPS/IMU-Positionierungs- und Navigationseinheit (IGI TERRAControl), die durch einen zusätzlichen Geschwindigkeitssensor (Redstall und Hunter, 2006) ergänzt wird. 3D Laser Mapping steuert die Hardware und Software bei, die für die Aufnahmeplanung, die Kontrolle der Scanner und die Datenspeicherung benötigt werden. Die nach dem Impulsmessverfahren arbeitenden Scanner stammen von der Firma Riegl. Die meisten existierenden StreetMapper-Systeme besitzen zwischen zwei und vier der älteren LMS-Q120 Laserscanner mit einer Reichweite von 150 m. Neuere StreetMapper setzen Riegl-Scanner des Typs VQ-180 (Sichtfeld: 100° , Reichweite: 150 m) oder VQ-250 (Sichtfeld: 360° , Reichweite: 300 m) ein (3D-Laser-Mapping, 2007). Abbildung 3.1b veranschaulicht den Systemaufbau des StreetMappers, wie er in dieser Arbeit zum Einsatz kam. Zwei horizontal gelagerte LMS-Q120i Scanner blicken jeweils in einem 20° -Winkel nach oben beziehungsweise nach unten. Die seitlichen Bereiche werden durch zwei vertikal angebrachte Zeilenscanner abgedeckt, die bezüglich der Fahrtrichtung um einen Winkel von 45° nach links und rechts ausgelenkt sind. Die linke Seite wird dabei durch einen LMS-Q140 Scanner, die rechte Seite durch einen LMS-Q120 Scanner erfasst. Das Sichtfeld der Scanner beträgt 80° . Die nominelle Distanzmessgenauigkeit der Scanner wird vom Hersteller für den LMS-Q120i und den LMS-Q120 auf einer maximalen Entfernung von 150 m auf 20 mm beziehungsweise 25 mm festgelegt (Riegl, 2009e,d); für den LMS-Q140 ist eine Genauigkeit von 25 – 50 mm angegeben (Riegl, 2001). Die absolute Genauigkeit der gemessenen 3D-Punkte beträgt in den vorliegenden Datensätzen bei guten GPS-Bedingungen 30 mm (Haala et al., 2008). In stark abgeschatteten Bereichen wächst sie auf einige Dezimeter an.

Das ROAMER-System ist eine Entwicklung des Finnischen Geodätischen Instituts FGI (Kukko et al., 2007). Es besteht aus einem 3D-Scanner des Typs Faro Photon 80 und dem Positionierungssystem NovAtel SPAN, das sich aus einem NovAtel DL-4 Plus GPS-Empfänger, einer NovAtel GPS-702-GG Antenne und einer inertialen Messeinheit des Typs Honeywell HG1700 AG58 zusammensetzt. Der Faro-Scanner basiert auf Phasemessung. Die Objekterfassung ist folglich in hoher Geschwindigkeit möglich; die Reichweite ist jedoch mit maximal 76 m entsprechend eingeschränkt. Kompensiert wird dies durch ein großes Sichtfeld sowie eine hohe Winkelauflösung (Faro, 2008).

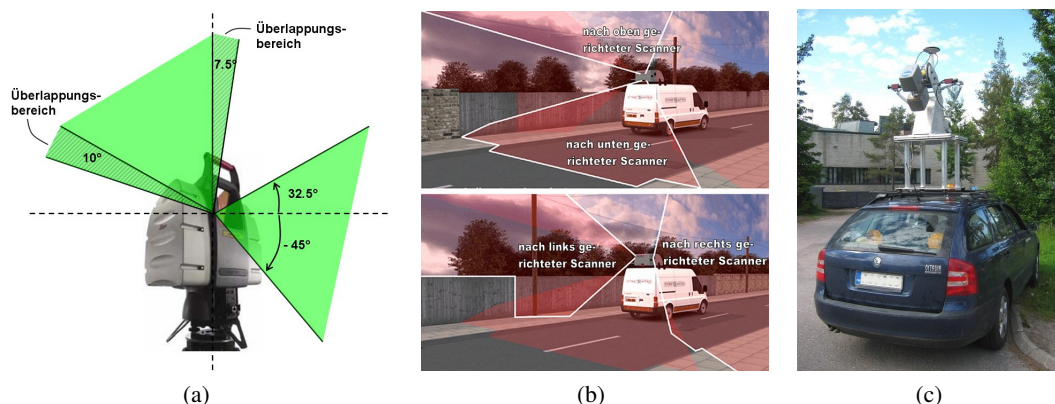


Abbildung 3.1: Verschiedene Scansysteme: Leica HDS3000-Scanner (a), StreetMapper-System (b), ROAMER-System (c).

Vorteilhaft wirkt sich ebenfalls die hohe Distanzmessgenauigkeit von 2 mm auf einer Entfernung von 25 m aus. Kleinere Veränderungen der Hardware, die im Wesentlichen die horizontale Auslenkung des 3D-Scanners verhindern, simulieren die Funktionsweise eines 2D-Zeilenscanners und bewirken so die Messung von Profilen. Das Sichtfeld, das ein solches Profil abdeckt, umfasst 320°. Abbildung 3.1c zeigt den typischen Systemaufbau am Beispiel des in dieser Arbeit genutzten ROAMERS. Der Scanner ist hochkant unter einem verstellbaren Neigungswinkel - hier unter einem Winkel von 45° - auf dem Fahrzeug montiert. Kukko et al. (2007) beziffern die Genauigkeit, mit der ein 3D-Punkt erfasst werden kann, auf wenige Zentimeter; für die erreichbare Positionierungsgenauigkeit liegt sie im unteren Dezimeterbereich.

3.2 Registrierung

Daten, die aus unterschiedlichen Sensoren stammen, zu unterschiedlichen Zeitpunkten oder von verschiedenen Standpunkten aus aufgenommen wurden, beziehen sich zunächst jeweils auf ein eigenes lokales Koordinatensystem. Eine gemeinsame Auswertung erfordert daher im Vorfeld die Registrierung der einzelnen Datensätze zueinander, so dass sie in einem einheitlichen Bezugssystem verfügbar sind (Lichti und Skaloud, 2010). Ziel dieses Abschnitts ist es, einen kurzen Überblick über bestehende Ansätze zur Registrierung zu geben. Betrachtet werden dabei mit Laserpunktwolken und Bildern solche Daten, die in der in Kapitel 4 vorgestellten Fassadenrekonstruktion zum Einsatz kommen. Arbeiten zur Registrierung von zwei oder mehreren Laserpunktwolken sind in Abschnitt 3.2.1 zu finden. Abschnitt 3.2.2 behandelt die Verknüpfung von Bildern und Abschnitt 3.2.3 zeigt Verfahren, die Laserpunktwolken und Bilder zusammenführen. Zum Schluss beschreibt Abschnitt 3.2.4 den in dieser Arbeit entwickelten, vollautomatischen Ansatz, der die Daten der hier verwendeten Sensoren vollautomatisch registriert und georeferenziert.

3.2.1 Registrierung von Laserpunktwolken

Um eine Objektszene durch terrestrisches Laserscanning vollständig zu erfassen, ist in der Regel die Aufnahme von mehreren Standpunkten aus notwendig. Ehe die Daten für nachfolgende Auswertungen genutzt werden können, müssen die pro Standpunkt in einem lokalen Koordinatensystem gegebenen Punktwolken über eine Starrkörpertransformation in ein gemeinsames Bezugssystem überführt werden. Handelt es sich bei diesem um ein geodätisches Koordinatensystem, ist im selben Zug das Problem der Georeferenzierung gelöst. Die nachfolgende Übersicht über Verfahren zur Registrierung von LiDAR-Punktwolken orientiert sich an der weitaus ausführlicheren Darstellung von Pfeifer und Böhm (2008) und folgt der dort vorgenommenen Unterteilung in markenbasierte, sensorbasierte und datengetriebene Ansätze.

Markenbasierte Verfahren erfordern den Einsatz von Zielmarken im Objektraum zur Signalisierung von Pass- oder Verknüpfungspunkten. Ist keine Georeferenzierung der Daten verlangt, sind Passpunkte überflüssig. Die in den Überlappungsbereichen der einzelnen Scans angebrachten Marken nehmen dann die Rolle von Verknüpfungspunkten ein; die Registrierung entspricht einer freien Netzausgleichung. Durch die Verwendung künstlicher Zielmarken lassen sich für die Registrierung Genauigkeiten im Bereich weniger Millimeter erreichen (Pfeifer und Böhm, 2008). Nachteile ergeben sich jedoch aus dem zusätzlichen manuellen Aufwand, der durch die Bestimmung und Signalisierung geeigneter Verknüpfungspunkte - gegebenenfalls auch durch das Einmessen von Passpunkten - entsteht. Zudem ist das Anbringen von Marken an den zu erfassenden Objekten nicht immer möglich. Verfahren, die ohne Marken auskommen, sind daher von großem Interesse und stellen seit einigen Jahren ein wichtiges Forschungsthema dar.

Im Fall der *sensorbasierten Registrierung* werden Sensoren zur direkten Bestimmung der äußeren Orientierungsparameter in die LiDAR-Messung miteinbezogen. Beim Mobile Mapping werden bereits erfolgreich GPS- und IMU-Komponenten integriert (Petrie, 2010; Haala et al., 2008). Entsprechende Sensoren lassen sich darüber hinaus auch beim statisch durchgeführten Laserscanning gewinnbringend einsetzen (Schuhmacher und Böhm, 2005; Vennegeerts et al., 2009). Die Genauigkeit der Registrierung hängt unmittelbar von der Qualität der Positionierungs-

und Orientierungssensoren ab. Insbesondere bei Verwendung von Low-Cost-Komponenten kann eine nachträgliche Verbesserung der Ergebnisse, beispielsweise durch datengetriebene Methoden, erforderlich sein.

Datengetriebene Verfahren zur Registrierung von Punktwolken ermitteln die notwendigen Transformationsparameter aus den LiDAR-Daten selbst. Salvi et al. (2007) geben eine Übersicht über die Vielzahl von Ansätzen, die in den vergangenen Jahren entwickelt wurden. Durchgesetzt haben sich Methoden, die auf dem von Besl und McKay (1992) vorgeschlagenen ICP-Algorithmus (engl.: *Iterative Closest Point*) basieren. Eine näherungsweise bekannte Transformation zwischen zwei Datensätzen wird hierbei genutzt, um zu jedem Punkt des einen Datensatzes den jeweils nächsten Punkt im anderen zu suchen. Auf der Grundlage der gefundenen Korrespondenzen werden die Transformationsparameter erneut geschätzt und in weiteren Iterationen verfeinert. Das Verfahren eignet sich nicht nur für die Zusammenführung zweier Punktmengen. Auch andere Repräsentationsformen wie etwa Liniensegmente, Vermaschungen oder andere Oberflächenbeschreibungen können miteinander und untereinander verknüpft werden. Für den ursprünglichen ICP-Algorithmus existieren mittlerweile zahlreiche Erweiterungen wie zum Beispiel die von Gühring (2001), mit der eine Registrierung von mehr als zwei Standpunkten möglich ist, oder die 3D-Kleinste-Quadrate-Zuordnung von Grün und Akca (2005). Eggert et al. (1998) und Rusinkiewicz und Levoy (2001) führen weitere ICP-Varianten auf. Mit dem auf Entfernungsbildern arbeitenden Verfahren von Chen und Medioni (1991) sowie der auf 3D-Daten ausgelegten „Normal Distribution Transform“ (NDT) von Ripperda und Brenner (2005) oder Magnusson et al. (2007) stehen weitere iterative Methoden für die Registrierung von 3D-Punktwolken zur Verfügung. Insgesamt lassen sich mit iterativen Ansätzen hervorragende Genauigkeiten erzielen (Pfeifer und Böhm, 2008), vorausgesetzt eine gute Näherungslösung liegt vor. Eine Reihe von Verfahren strebt daher die automatische Durchführung einer groben Registrierung an, deren Ergebnisse hinreichend gute Näherungswerte für eine anschließende iterative Verfeinerung darstellen. Ein prominentes Beispiel liefert Dold (2005) mit dem Prinzip des „Extended Gaussian Image“ (EGI). Merkmalsbasierte Ansätze wie die von Dold und Brenner (2006), von Hansen (2006) und Schenk und Hanke (2009) registrieren Punktwolken über die Extraktion und Zuordnung ebener Flächenstücke. Rabbani et al. (2007) gehen darüber hinaus und lassen als Verknüpfungselemente jegliche Art rekonstruierter Oberflächen zu. Generell kann die Integration zusätzlicher Information die Zuordnung von Scans stabilisieren. So berücksichtigt beispielsweise Wendt (2004) Intensitätswerte, die von einer mit dem Laserscanner koregistrierten Kamera erfasst werden.

3.2.2 Registrierung von Bildern

Die Orientierung von Bildern und ihre Automatisierung stellt eine zentrale Aufgabe in der Photogrammetrie dar. Während in der Luftbildphotogrammetrie bereits kommerzielle Software-Produkte für die automatische zielmarkenfreie Orientierung von Stereobildpaaren verfügbar sind (zum Beispiel HATS von Helava/Leica, Phodis-AT von Zeiss, ISDM von Intergraph und MATCH-AT von INPHO), besteht im terrestrischen Anwendungsfall noch immer Forschungsbedarf. Remondino und Ressel (2006) nehmen auf der Grundlage des Basisverhältnisses eine Einteilung in drei Szenarien vor: Bildsequenzen mit kleinem, mittlerem und großem Basisverhältnis.

Bildfolgen mit kleinem Basisverhältnis werden typischerweise durch Videokameras erfasst. Die Basislängen zwischen den in hoher Frequenz aufgenommenen Einzelbildern sind gemessen am Abstand zum Objekt nicht signifikant. Aufeinanderfolgende Bilder unterscheiden sich in der Regel nur durch geringe Verschiebungen der abgebildeten Objekte, so dass für die Suche nach korrespondierenden Bildinhalten die einfach zu berechnende Kreuzkorrelation angewendet werden kann (Beardsley et al., 1996; Roth und Whitehead, 2000). Aufgrund der kleinen Parallaxen bieten sich zudem Verfahren der Merkmalsverfolgung an. Einer der bekanntesten Ansätze ist der von Shi und Tomasi (1994), der auf Ergebnissen von Lucas und Kanade (1981) und Tomasi und Kanade (1991) aufbaut. Weitere Arbeiten sind in Nistér (2001) referenziert. Bildmerkmale, die sich zur Verknüpfung derartig dichter Bildfolgen eignen, lassen sich durch Interest-Operatoren wie zum Beispiel den Förstner- (Förstner und Gülch, 1987) oder den Harris-Operator (Harris und Stephens, 1988) extrahieren.

Bildsequenzen mit mittlerem Basisverhältnis weisen relativ zum Objektabstand bereits signifikante Basislängen auf. Sie entstehen aus Videoaufnahmen, bei denen nicht jedes Einzelbild verwendet wird, oder werden durch Still-Video-Kameras aufgezeichnet. Verfahren, die sich mit der automatischen Orientierung solcher Bildverbände - im

Englischen als „*shape-from-video*” oder „*video-to-3D*” bekannt - beschäftigen, benötigen große Überlappungsbereiche sowie texturreiche Bildinhalte (van Gool und Zisserman, 1996; Zisserman et al., 1999; Pollefeys, 2004). Für die Merkmalsextraktion werden auch hier üblicherweise Interest-Operatoren verwendet. Eine Zuordnung der in benachbarten Aufnahmen detektierten Bildmerkmale mit Hilfe der Kreuzkorrelation kann allerdings zu einer Vielzahl an falschen Korrespondenzen führen. Gründe hierfür sind unter anderem der im Gegensatz zum erstgenannten Szenario erweiterte Suchbereich sowie perspektive Unterschiede in den Bildern. Um falsche Zuordnungen auszuschließen, können geometrische Bedingungen eingeführt werden, die aufgrund der Epipolargeometrie in aufeinanderfolgenden Bildern erfüllt sein müssen (Remondino und Ressel, 2006). (Hao und Mayer, 2003) demonstrieren die erfolgreiche Orientierung entsprechender Bildsequenzen. Kleinere Versätze zwischen benachbarten Kamerastandpunkten lassen sich überbrücken; größere Bildrehungen jedoch, die zum Beispiel 15° überschreiten, können auf diese Weise nicht kompensiert werden (Läbe und Förstner, 2005).

Unter *Bildsequenzen mit großem Basisverhältnis* werden solche Konfigurationen zusammengefasst, bei denen homologe Strahlen einen Winkel größer 25° einschließen. Große Abstände zwischen den Kamerastandpunkten sowie beträchtlich voneinander abweichende Aufnahmerichtungen resultieren in perspektiven Effekten, die insbesondere die Kanten- und Eckbereiche des Aufnahmeobjekts in den einzelnen Bildern unterschiedlich darstellen. Eine korrekte Zuordnung korrespondierender Interest-Punkte, die vorzugsweise an Kanten beziehungsweise Ecken detektiert werden, wird dadurch verhindert (van Gool et al., 2002). Eine Reihe von Ansätzen verwenden daher statt Punktdetektoren Deskriptoren für Regionen, da diese von perspektivisch bedingten Abbildungsunterschieden weniger stark betroffen sind (Pritchett und Zisserman, 1998; Baumberg, 2000; Matas et al., 2004; Schaffalitzky und Zisserman, 2002; Tuytelaars und van Gool, 2004; Mikolajczyk et al., 2005). Die Regionen werden über Merkmale beschrieben, die im Wesentlichen invariant gegenüber affinen Transformationen und Helligkeitsänderungen sind. Die Zuordnung erfolgt über die Distanz der Regionen im Merkmalsraum. Auf der Grundlage experimenteller Untersuchungen haben Mikolajczyk und Schmid (2005) den SIFT-Operator (*engl.: Scale Invariant Feature Transform*) (Lowe, 2004) als den robustesten Algorithmus für die automatische Orientierung von Bildsequenzen mit großen Basislinien identifiziert. Das große Potential dieses maßstabs-, rotations- und beleuchtungsinvarianten Operators wird in zahlreichen weiteren Arbeiten bestätigt (Roth, 2004; Roncella et al., 2005; Läbe und Förstner, 2006).

3.2.3 Registrierung von Laserpunktwolken und Bildern

Anders als bei hybriden Messsystemen (Kersten et al., 2006; Petrie, 2010), bei denen Lage und Orientierung der einzelnen Sensoren zueinander durch Kalibrierung bestimmt sind, erfordert der unabhängige Einsatz von Laserscanner und Kamera die Registrierung der resultierenden Datensätze. Forschungsarbeiten, die sich mit der automatischen Zusammenführung terrestrischer LiDAR- und Bilddaten befassen, suchen nach 2D-3D-Korrespondenzen in Form von Punkten, Kanten oder Konturen. Grundsätzliche Beschränkungen der entwickelten Verfahren ergeben sich hierbei entweder aus den Vorbedingungen, die an die Aufnahmeconfiguration und an die Größe des erfassten Objekts gestellt werden, oder aus der Notwendigkeit spezieller Marken im Objektraum oder manueller Interaktion. Aguilera und Lahoz (2006) stützen die Suche nach korrespondierenden Punkten in Bild- und LiDAR-Daten auf räumliche Invarianzen, sind dabei jedoch auf den Einsatz von Zielmarken angewiesen. Die Objektszene muss zudem vorgegebenen geometrischen Bedingungen gehorchen. In ähnlicher Weise nutzen Al-Manasir und Fraser (2006) codierte Marken, um die notwendigen identischen Punkte für eine 3D-Ähnlichkeitstransformation bereitzustellen. Wird auf die Verwendung von Zielmarken verzichtet, ist die Identifikation korrespondierender Punkte erschwert. Die Abtastung der Umgebung durch Laserscanning in einem vorgegebenen, im Vergleich zur Kameraaufnahme oftmals deutlich größeren Raster führt dazu, dass ein Objektpunkt höchstens zufällig in Bild und Laserpunktwolke repräsentiert ist. Einige Verfahren mit hohen Genauigkeitsansprüchen extrahieren daher anstelle von Punkten Liniensegmente aus den LiDAR-Daten. Meierhold et al. (2008) leiten aus der LiDAR-Punktwolke 3D-Geradenstücke ab, die sie entweder mit Punkten oder Liniensegmenten des 2D-Bildes verknüpfen. Basierend auf der Annahme, dass die aufgenommene Objektszene eine Vielzahl horizontal und vertikal verlaufender Strukturen beinhaltet, führt Stamos (2009) eine Zuordnung von Fluchtpunkten durch, die aus der Auswertung von Liniensegmenten in Bild und Punktwolke resultieren.

Während die bisher genannten Ansätze einen direkten Zusammenhang zwischen 2D-Bildelementen und 3D-Information herstellen, reduzieren andere Verfahren das 2D-3D-Korrespondenzproblem auf eine 2D-2D-Zuordnung. Ausgangspunkt ist hierbei die Repräsentation der 3D-Punktwolke als bildhafte Darstellung. Elstrom (1998) überführt die LiDAR-Punkte in ein Entfernungsbild; die Zuordnung zur Kameraaufnahme erfolgt über die in beiden Bildern extrahierten Punkt-, Kanten- und Konturmerkmale. Einen ähnlichen Ansatz, hier jedoch auf kleine und einfache Objekte beschränkt, verfolgen Ikeuchi et al. (2003), die Kamera- und Entfernungsbilder über korrespondierende Kanten registrieren. Alshawabkeh et al. (2006) nutzen Entfernungsbilder, um auf Basis der mittleren Krümmung Linien zu detektieren, die invariant gegenüber Rotation und Verschiebung sind. Kameraaufnahmen werden in ähnlicher Weise segmentiert. Mit dem Ziel einer kombinierten Auswertung von Helligkeits-, Entfernungs- und Intensitätsbildern stellen Wendt und Heipke (2007) einen flächenbasierten Orientierungsansatz vor. Sie erweitern die konventionelle Bildzuordnung, indem Entfernungen und Laserintensitäten als zusätzliche Beobachtungen in das Modell integriert werden. Ursprünglich ausgelegt für kombinierte Sensorsysteme, in denen Laserscanner und Kamera bereits koregistriert sind (Wendt, 2004), ist hier auch die Hinzunahme von Kameraaufnahmen möglich, die von unabhängigen Standpunkten aus aufgenommen wurden. Das vollautomatische Registrierungsverfahren von González-Aguilera et al. (2009) verknüpft Entfernungsbilder und Kameraaufnahmen über Interest-Punkte, die mit Hilfe des Förstner-Operators (Förstner und Gülch, 1987) gefunden werden. Die Zuordnung verläuft jedoch nur dann erfolgreich, wenn die Basislinie zwischen Scanner- und Kamerastandpunkt hinreichend klein ist, so dass die Suche nach korrespondierenden Interest-Punkten nicht durch perspektivische Effekte beeinträchtigt wird. Größere Maßstabsunterschiede sind gegebenenfalls durch Resampling der Kameraaufnahme zu vermeiden.

3.2.4 Durchgeführter Ansatz zur Registrierung von Laserpunktewolken und Bildern

Mit dem Ziel einer vollautomatischen Prozesskette, die nicht nur den thematischen Schwerpunkt dieser Arbeit, die 3D-Fassadenmodellierung, sondern auch die Vorverarbeitung der Beobachtungsdaten einschließt, wurde hier beispielhaft ein Verfahren zur automatischen Registrierung und Georeferenzierung von LiDAR-Punktewolken und Bildern bereitgestellt (Becker und Haala, 2007a). Ziel des Verfahrens war nicht die universelle Anwendbarkeit auf alle denkbaren Scanner-Varianten. Der Ansatz konzentriert sich stattdessen auf solche Laserscanner, die ihre Umgebung in einem vorgegebenen regelmäßigen Raster abtasten; der im Weiteren vielfach eingesetzte Laserscanner HDS3000 von Leica ist ein Beispiel hierfür. An die Aufnahmepositionen der Bilder sind keine Bedingungen geknüpft. Die innere Orientierung der verwendeten Kamera muss allerdings bekannt sein. Ein unverzichtbarer Bestandteil ist zudem ein bereits georeferenziertes 3D-Stadtmodell, das mit seinen LOD2-Gebäudemodellen jedoch ohnehin für die in den nachfolgenden Kapiteln beschriebene Fassadenrekonstruktion benötigt wird und somit keine zusätzliche Voraussetzung darstellt. Das Verfahren beginnt mit der Registrierung und Georeferenzierung der von verschiedenen Standpunkten aus aufgenommenen LiDAR-Punkte. Die dabei durch kostengünstige Positionierungs- und Orientierungssensoren direkt gemessenen äußeren Orientierungsparameter werden mit Hilfe des Stadtmodells iterativ verfeinert. In weiteren Schritten werden die Bilder über homologe Punkte relativ zueinander orientiert und mit der georeferenzierten Punktewolke über Passpunktinformationen verknüpft. Sowohl die homologen Punkte als auch die Passpunkte werden dabei vollautomatisch abgeleitet. Im Folgenden werden die einzelnen Verfahrensschritte erläutert und an einem abschließenden Beispiel veranschaulicht.

- **Registrierung und Georeferenzierung der LiDAR-Daten:** Um eine aufwendige Signalisierung von Passpunkten im Vorfeld zu vermeiden, wird der Bezug der lokal aufgemessenen LiDAR-Punktewolken zum übergeordneten globalen Koordinatensystem durch direkte Georeferenzierung hergestellt. Hierfür werden preiswerte Positionierungs- und Orientierungskomponenten in Form eines Low-Cost-GPS-Empfängers und eines digitalen Kompasses auf dem Scannerkopf angebracht. Mit dem hier eingesetzten Kompass TCMVR-50 sind prinzipiell Genauigkeiten für die Azimutbestimmung von unter 1° möglich (TCM, 2003). Störende Einflüsse durch parkende Autos oder elektrische Installationen können jedoch zu einer deutlich reduzierten Genauigkeit von ca. 6° führen (Hoff und Azuma, 2000). Der verwendete Low-Cost-GPS-Empfänger arbeitet mit einem SIRF II Chip. Unter Ausnutzung des EGNOS-Korrektursignals lassen sich Lagegenauigkeiten im Bereich von 2 m erzielen. Die weniger genaue vertikale Komponente der GPS-Messung wird durch Höhenwerte aus einem digitalen Geländemodell ersetzt, das eine Genauigkeit von etwa 0.15 m aufweist.

Das Ergebnis der für jeden Standpunkt durchgeführten direkten Georeferenzierung wird anschließend aufbauend auf dem ICP (*engl.: Iterative Closest Point*) - Algorithmus von Besl und McKay (1992) schrittweise verfeinert. Zunächst geschieht dies innerhalb einer iterativ durchgeführten Registrierung der einzelnen Scans zueinander. Die so bestimmte relative Lage und Orientierung der Einzelscans wird festgehalten, so dass die von den verschiedenen Standpunkten aus aufgenommenen 3D-Punkte zu einer einzigen, in sich starren Punktwolke kombiniert werden. In einer erneuten Anwendung des ICP-Ansatzes werden diese Punktwolke und das vom Stadtmessungsamt Stuttgart bereitgestellte Stadtmodell zueinander registriert. Während die Dachflächen des Stadtmodells aus halbautomatischen photogrammetrischen Auswertungen entstanden sind, wurden die Grundrisse der Gebäude geodätisch vermessen und zu Fassadenflächen extrudiert (Wolf, 1999). Die Lagegenauigkeit der Fassadenflächen bewegt sich folglich im unteren Zentimeterbereich, so dass durch die Anfelderung der Punktwolke an das Stadtmodell eine deutliche Genauigkeitssteigerung für die Georeferenzierung der Punktwolke erreicht werden kann.

- **Verknüpfung der Bilder:** Um die relative Orientierung der Bilder wiederherzustellen, werden Verknüpfungspunkte benötigt. Für die automatische Extraktion der homologen Punkte wird der von Lowe (2004) entwickelte SIFT-Operator (*engl.: Scale Invariant Feature Transform*) verwendet. Dank seiner Rotations- und Maßstabsinvarianz erweist er sich als robustes Verfahren, um auch Bilder mit großen Basislinien und entsprechend starken projektiven Verzerrungen zueinander verknüpfen zu können. Die Qualität einer Zuordnung zweier SIFT-Punkte kann anhand der euklidischen Distanz ihrer Repräsentation im Merkmalsraum beurteilt werden, wobei ein kleiner Abstand mit höherer Wahrscheinlichkeit auf das Vorliegen eines homologen Punktepaars hindeutet als ein großer. Falsche Zuordnungen werden über ein auf der RANSAC (*engl.: Random Sample Consensus*) - Methode (Fischler und Bolles, 1981) basierendes Verfahren ausgeschlossen. In m Durchläufen werden jeweils fünf Kandidaten möglicher Punktepaare zufällig ausgewählt, auf deren Grundlage die relative Orientierung nach der direkten Lösung von Nistér (2004) berechnet wird. Das Ergebnis dieses Fünf-Punkt-Algorithmus ist nicht eindeutig, sondern besteht in der Regel aus vier bis sechs, maximal zehn Lösungen. Davon scheiden unmittelbar diejenigen als ungültig aus, bei denen nicht alle Objektpunkte zwischen Kamerastandpunkten und Aufnahmeobjekt zu liegen kommen. Aus den verbleibenden Lösungen wird diejenige mit der besten Qualität ausgewählt. Die Qualität eines Ergebnisses lässt sich abschätzen, indem sie gegen alle übrigen Punktepaare hinsichtlich der Einhaltung der Koplanaritätsbedingung getestet wird. Auf dieselbe Weise wird schließlich aus den m Resultaten aller Versuche die qualitativ beste Lösung ermittelt und als endgültiges Ergebnis akzeptiert. Widersprechende Punktkorrespondenzen werden verworfen.
- **Georeferenzierung der Bilder:** Die Bereitstellung von Passpunktinformation ist eine notwendige Voraussetzung, um die äußeren Orientierungen der Bilder bestimmen zu können. Dieser Schritt ist für den Nutzer üblicherweise mit Aufwand verbunden: entweder bereits bei der Datenaufnahme, wenn zur Signalisierung von Passpunkten spezielle Zielmarken angebracht werden, oder, falls dies nicht geschieht, bei der Nachbearbeitung der Daten, da die Passpunkte dann in sämtlichen Bildern manuell identifiziert und angemessen werden müssen. Um beides zu umgehen, wird hier eine Strategie verfolgt, die auf demselben Prinzip beruht wie die vollautomatische Verknüpfung der Bilder untereinander (Böhm und Becker, 2007). Der in dieser Arbeit eingesetzte Leica HDS3000-Scanner tastet die Umgebung in einem vorgegebenen polaren Raster ab. Über die zu jedem Zeitpunkt bekannte Auslenkung des Laserstrahls und die jeweils ermittelte Distanz zum Objekt können für jeden erfassten Objektpunkt 3D-Koordinaten berechnet werden. Zusätzlich wird die Amplitude des reflektierten Signals gespeichert; sie repräsentiert die Reflektivität der Objektoberfläche am Messpunkt. Die im Abtastvorgang des Laserscannings implizit enthaltene topologische Information kann genutzt werden, um die Amplitudenwerte der erfassten 3D-Punkte als 2D-Reflektivitätsbild darzustellen. Darin verweist jedes Pixel mit einem gültigen Reflektivitätswert auf die 3D-Koordinaten des betreffenden Objektpunktes. Durch den Übergang auf 2D-Reflektivitätsbilder lässt sich der Bezug zwischen den Fotoaufnahmen und den bereits georeferenzierten 3D-Punkten mit Hilfe von Bildverarbeitungsmethoden herstellen. Hierbei sind jedoch wesentliche Unterschiede zwischen den künstlich erzeugten Reflektivitätsbildern und den Aufnahmen üblicher Standardkameras zu berücksichtigen. Sie betreffen unter anderem die spektrale Bandbreite der Aufnahmesensoren, die beispielsweise im Fall des Leica HDS3000-Scanners auf

einen sehr engen Wellenlängenbereich um 532 nm begrenzt ist. Einfluss haben zudem die im Zusammenhang mit der Verwendung aktiver und passiver Sensoren stehenden Beleuchtungsarten. Während Aufnahme- und Beleuchtungsrichtung beim Laserscanning identisch sind, wird bei Fotoaufnahmen üblicherweise Umgebungslicht als Beleuchtungsquelle genutzt, was zu Schattenwurf und damit zu Grauwertkanten führen kann, die im Laser-Reflektivitätsbild keine Entsprechung finden. Weitere Unterschiede sind auf die Abbildungsgeometrien der Systeme zurückzuführen. So basiert das Reflektivitätsbild im Gegensatz zur Fotoaufnahme nicht auf Zentralprojektion, sondern auf Polargeometrie, so dass langgestreckte Geraden je nach Lage zum Aufnahmesensor gekrümmt wiedergegeben werden. Darüber hinaus wird beim Laserscanning in der Regel ein weitaus größerer Abtastabstand verwendet, als es bei Kameras mit hoher Auflösung der Fall ist.

Für die Suche nach Punktkorrespondenzen zwischen Laser-Reflektivitätsbild und Fotoaufnahmen hat sich - wie auch schon bei der Verknüpfung mehrerer Fotos - der SIFT-Algorithmus als geeignet erwiesen, da er robust gegenüber Helligkeits- und Maßstabsänderungen ist und anstelle von Kantendetektoren Deskriptoren für Regionen verwendet. Die in der Menge der Punktkorrespondenzen enthaltenen falschen Zuordnungen werden über eine RANSAC-basierte Berechnung eines geschlossenen räumlichen Rückwärtsschnitts eliminiert. Die SIFT-Punkte, die über das Reflektivitätsbild auf 3D-Koordinaten verweisen, nehmen hierbei die Rolle von Passpunkten ein. Der räumliche Rückwärtsschnitt wird auf der Grundlage dreier Passpunkte durchgeführt. Um Mehrfachlösungen auszuschließen, wird ein vierter Punkt benötigt, der nicht auf einer kritischen Kurve liegt (Zeng und Wang, 1992). Nach jeder RANSAC-Iteration wird die Anzahl der Passpunkte ermittelt, die mit der aktuell berechneten äußeren Orientierung vereinbar sind. Aus allen Ergebnissen wird schließlich das mit den meisten zugehörigen Passpunkten ausgewählt.

Die Genauigkeit der resultierenden äußeren Orientierungsparameter hängt von der Konfiguration der SIFT-Punktkorrespondenzen ab. Liegen diese eng zusammen, wird die Lösung des Rückwärtsschnitts instabil und die Unsicherheit der SIFT-Punktkoordinaten (Remondino und Ressel, 2006) führt zu signifikanten Änderungen der Orientierungsparameter. Für eine genügend große Anzahl gut verteilter Punkte reicht die erzielte Genauigkeit der berechneten Orientierungsparameter jedoch aus, um als Näherungswerte in eine abschließende Bündelblockausgleichung eingeführt und dort unter Einbeziehung der im vorhergehenden Schritt bestimmten Verknüpfungspunkte verfeinert zu werden.

Die Registrierung von Punktwolke zu Punktwolke beziehungsweise von Punktwolke zu Stadtmodell wird mit der in Leicas HDS Software-Paket Cyclone 5.3 verfügbaren ICP-Implementierung realisiert. Die Extraktion und Zuordnung von SIFT-Punkten basiert auf dem frei zugänglichen MATLAB-Code von Vedaldi (2007). Die Berechnung der relativen Orientierung nutzt den von Stewénius et al. (2006) bereitgestellten C-Code, der in ein selbst geschriebenes MATLAB-Programm eingebettet ist. Für die Berechnung des räumlichen Rückwärtsschnitts wurde die geschlossene Lösung von Zeng und Wang (1992) in MATLAB nachimplementiert. Die abschließende Bündelblockausgleichung wird mit Hilfe des Software-Pakets Photometrix Australis 6.0 durchgeführt.

Abbildung 3.2a-c zeigt die mit einer kalibrierten Kamera (NIKON D2x , NIKKOR 20mm, Bildgröße 4288 × 2848 pix) aufgenommenen Bilder des am Stuttgarter Schillerplatz gelegenen historischen Gebäudes „Alte Kanzlei“. Mit dem Leica HDS3000-Scanner wurden im selben Bereich von drei Standpunkten aus 3D-Punkte erfasst. Eine der so gewonnenen Punktwolken sowie das daraus abgeleitete Reflektivitätsbild sind in Abbildung 3.3a und b zu sehen. Abbildung 3.3c veranschaulicht schließlich die durch den SIFT-Algorithmus gefundenen Punktkorrespon-



Abbildung 3.2: Fotoaufnahmen der Alten Kanzlei (a-c), Ergebnis der Bündelblockausgleichung (d).

denzen zwischen dem Reflektivitätsbild und einer der Fotoaufnahmen. Die beiden Bilder sind hierbei in ihrem wahren Größenverhältnis dargestellt. Auf der Basis der Standardeinstellungen der verwendeten SIFT-Implementierung wurden im Reflektivitätsbild 492 und in der Fotoaufnahme 5519 Merkmalspunkte extrahiert. Für diese konnten 31 Zuordnungen gefunden werden - in Abbildung 3.3c durch rote Linien repräsentiert -, von denen innerhalb des RANSAC-Prozesses 22% als korrekt erkannt wurden. Das Ergebnis der abschließenden Bündelblockausgleichung ist in Abbildung 3.2d visualisiert. Die Standardabweichungen, die dabei für die geschätzten äußeren Orientierungsparameter der drei Fotos im Durchschnitt erreicht wurden, betragen $\sigma_{x_0} = 7.6 \text{ cm}$, $\sigma_{y_0} = 5.6 \text{ cm}$, $\sigma_{z_0} = 8.1 \text{ cm}$, $\sigma_{az} = 0.167^\circ$, $\sigma_{el} = 0.164^\circ$ und $\sigma_{roll} = 0.066^\circ$. Die berechneten Objektkoordinaten weisen durchschnittliche Standardabweichungen von $\sigma_x = 3.3 \text{ cm}$, $\sigma_y = 4.7 \text{ cm}$ und $\sigma_z = 2.1 \text{ cm}$ auf.

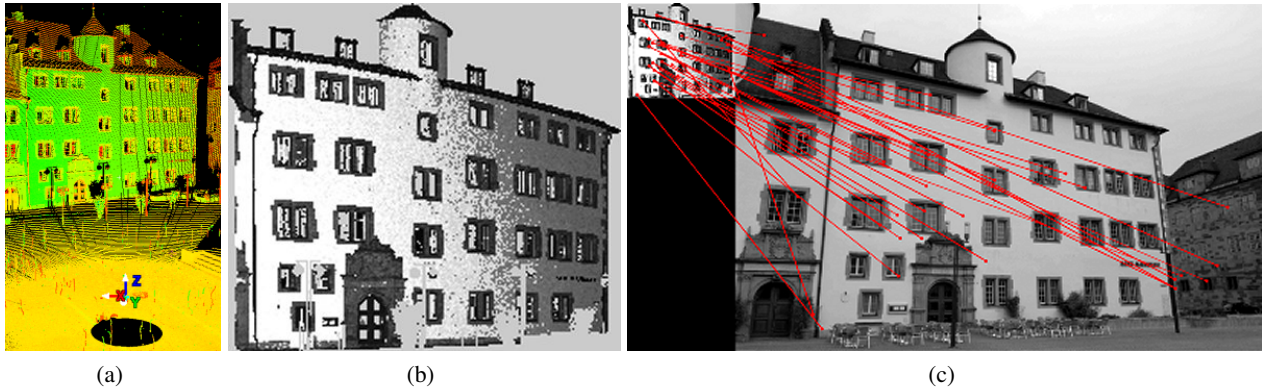


Abbildung 3.3: Sensordaten-Integration für die Alte Kanzlei: 3D-LiDAR-Punktwolke (a), 2D-Reflektivitätsbild (b), SIFT-Punktkorrespondenzen zwischen Reflektivitätsbild und Fotografie (c).

Da es sich bei dem gezeigten Ansatz lediglich um einen Randaspekt der Arbeit handelt, wird auf ausführliche Genauigkeitsanalysen sowie Untersuchungen der Stabilität des Verfahrens an dieser Stelle verzichtet. Angaben zur Genauigkeit der beschriebenen Georeferenzierung von LiDAR-Punktwolken können Schuhmacher und Böhm (2005) entnommen werden. Läbe und Förstner (2005) berichten über Erfahrungen mit der Wiederherstellung der relativen Orientierung von Bildpaaren unter Verwendung von SIFT-Punktkorrespondenzen. Weitere Beispiele zur SIFT-basierten Registrierung von LiDAR-Punktwolken und Bildern sind in Böhm und Becker (2007) zu finden.

3.3 Objektrepräsentation

Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über Repräsentationsformen von 3D-Objekten gegeben, die für die Rekonstruktion in dieser Arbeit eine Rolle spielen. Betrachtet werden Repräsentationsformen von sowohl allgemeinen 3D-Körpern als auch 3D-Gebäudemodellen.

Die Repräsentationsform von 3D-Objekten hängt eng zusammen mit der Art und Weise, in der die geometrische Modellierung erfolgt. Für diese Arbeit ist die sogenannte Festkörpermodellierung von besonderer Bedeutung, bei der ausschließlich geschlossene Beschreibungen von physikalisch festen Körpern generiert werden (Foley et al., 1990; Samet, 2005). Es existieren unterschiedliche Modellierungsarten, die sich den Kategorien Konstruktive Modelle, Dekompositionsmodelle und Randbeschreibung zuordnen lassen (Mäntylä, 1988). Beispiele für Konstruktive Modelle sind die Parameterdarstellung, die Sweep-Repräsentation, die Halbraummodellierung und die Konstruktion mit Raumprimitiven. Sie alle erzeugen komplexe 3D-Objekte, indem einzelne geometrische Grundelemente verändert beziehungsweise kombiniert werden. Zu den Dekompositionsmodellen, die ein 3D-Objekt als Summe einzelner Bausteine begreifen, gehören die Zellenzerlegung und das Enumerationsverfahren. Im Bereich des computergestützten Entwurfs (*engl.: Computer Aided Design, CAD*) sind die Randbeschreibung und die Konstruktion mit Raumprimitiven am gebräuchlichsten.

Die Randbeschreibung (*engl.: Boundary Representation, B-Rep*) stellt ein räumliches Objekt über dessen Begrenzungselemente dar (Foley 1995; aus Kolbe2005). Die topologischen Primitive Flächen, Kanten und Knoten unterstehen dabei einer klaren hierarchischen Ordnung. Die Randelemente eines 3D-Objekts resultieren häufig aus dem Rekonstruktionsprozess selbst. So führt beispielsweise die Approximation einer Punktwolke durch mehrere Ebenen und deren anschließende Verschneidung unmittelbar zu einzelnen Segmenten der Außenhülle. Diese Segmente zu einer topologisch richtigen Randbeschreibung zusammenzufügen, ist ein nicht triviales Problem; die korrekte und effiziente Implementierung gestaltet sich schwierig (Rottensteiner, 2001). Die Aufgabe wird zusätzlich kompliziert, wenn geometrische Restriktionen wie das Aneinandergrenzen von Flächen, Parallelität oder Rechtwinkligkeit zu beachten sind.

Anders verhält es sich, wenn eine Konstruktion mit Raumprimitiven (*engl.: Constructive Solid Geometry, CSG*) angewandt wird. Ein Festkörper wird modelliert, indem einfache, in der Regel parametrisierte 3D-Primitive über boolesche Operatoren kombiniert werden (Mäntylä, 1988). Werden ausnahmslos reguläre Mengenoperationen durchgeführt, kann die topologische Korrektheit der Grundprimitive innerhalb des Rekonstruktionsprozesses gewahrt werden, so dass nur gültige Körper entstehen. Geometrische Eigenschaften der 3D-Primitive wie etwa das Einschließen rechter Winkel oder die identische Ausrichtung von Flächen erleichtern zudem die Einhaltung entsprechender geometrischer Bedingungen bei der Rekonstruktion (Brenner, 2004). Über die Konstruktion mit Raumprimitiven lassen sich selbst komplexe Festkörper intuitiv aufbauen und einfach beschreiben. Für ihre Visualisierung sind jedoch Randbeschreibungen zu bevorzugen. Eine Konvertierung ist algorithmisch zwar leicht möglich, numerische Ungenauigkeiten, die insbesondere bei geometrisch ungünstigen Konfigurationen wie zum Beispiel schleifenden Schnitten ins Gewicht fallen, stellen allerdings hohe Anforderungen an die Stabilität der Implementierung (Hoffmann, 1989).

Hier erweist sich die Zellenzerlegung, die allgemeinste Form der Dekompositionsmodelle, als hilfreich. Für die Modellierung werden elementare 3D-Primitive, sogenannte Zellen, herangezogen. Diese berühren sich gegenseitig, dürfen sich anders als bei CSG-Repräsentationen aber nicht überlappen. Ein beliebiger Festkörper ergibt sich schließlich aus einer besonderen Art der Vereinigungsoperation, in der Zellen, die sich in einem Eckpunkt, entlang einer Kante oder einer Fläche berühren, verschmolzen werden. Die Form der Zellen ist weitgehend frei, solange sie die topologischen Eigenschaften einer Kugel aufweisen, das heißt keine Löcher besitzen. Diese Formenvielfalt steht im Gegensatz zum Enumerationsverfahren, bei dem ein Festkörper aus identischen, meist würfelförmigen Volumenelementen zusammengesetzt wird. Als Grundbestandteile eines regelmäßigen 3D-Rasters werden sie üblicherweise auch als Voxel bezeichnet. Ein Festkörper definiert sich über diejenigen Voxel, die innerhalb des Körpers liegen. Nachteile des Verfahrens wie etwa der große Speicherplatzbedarf oder die auf die Größe der Rasterelemente beschränkte räumliche Auflösung des Objekts können durch Zellenzerlegung umgangen werden. Das Prinzip der Zellenzerlegung eignet sich generell für die Rekonstruktion topologisch korrekter Gebäudemodelle in unterschiedlichen Detailgraden. Kada (2007) hat dies bereits am Beispiel der Gebäudegeneralisierung gezeigt. Wie aus Kapitel 4 hervorgeht, erweist sich die Zellenzerlegung ebenso als vorteilhaft, wenn es darum geht, den geometrischen Detailgrad eines groben Gebäudemodells zu erhöhen. Durch eine geeignete Wahl von Teilungsebenen lassen sich geometrische Eigenschaften wie Parallelität oder Rechtwinkligkeit einfach realisieren. Die in der Zellenzerlegung implizit enthaltene topologische Information begünstigt zudem die Berücksichtigung semantischer Beziehungen zwischen benachbarten Zellen.

Grundsätzlich können 3D-Gebäudemodelle durch alle aufgeführten Modellierungsarten erzeugt beziehungsweise beschrieben werden. Welche Variante schließlich zum Zug kommt, wird unter anderem durch die Anwendung und die Art der Sensordaten bestimmt, aus denen das Gebäude rekonstruiert wird. Davon unabhängig werden Gebäuderepräsentationen zum Zweck der Speicherung und des Datenaustausches in der Regel in eine Randbeschreibung überführt. Für den Export existieren Standardformate wie VRML, X3D, DXF oder COLLADA. Eine ausführliche Beschreibung dieser und anderer Datenformate ist in Kolbe et al. (2009) zu finden. Sie eignen sich zwar für die Darstellung der 3D-Geometrien, komplexe semantische Informationen werden jedoch nicht unterstützt. Abhilfe schafft hier das Datenschema CityGML (Kolbe et al., 2005), das mittlerweile durch das Open Geospatial Consortium (OGC) als Standard akzeptiert wurde. Im Gegensatz zu vielen anderen Datenformaten lassen sich in CityGML nicht nur geometrische und graphische Eigenschaften abbilden, sondern auch die zugehörige Semantik, Generali-

sierungshierarchien zwischen thematischen Klassen sowie Beziehungen einzelner Objekte untereinander. CityGML schafft somit die Voraussetzung für intelligente Visualisierungsmethoden und Anwendungen, die semantische Informationen benötigen. Darüber hinaus können relevante Objekte aus den Bereichen Vegetation, Gewässer und Verkehr modelliert werden. Das einheitliche Datenmodell sowie standardisierte Schnittstellen erleichtern sowohl den Zugriff auf Gebäudemodelle als auch den Datenaustausch und begünstigen so eine nachhaltige und effiziente Nutzung von 3D-Stadtmodellen. CityGML ist als Anwendungsschema der Geography Markup Language 3.1.1 (GML3) (Cox et al., 2004) implementiert. Der Austausch raumbezogener, mit Attributen und Relationen versehener Objekte ist damit möglich. Das Datenmodell basiert auf einer Reihe von Standards aus der Normenfamilie ISO 191xx, dem OGC, dem W3C Consortium, dem Web 3D Consortium und aus OASIS (Gröger et al., 2008).

CityGML unterstützt fünf verschiedene Detailstufen (*engl.: Levels Of Detail, LOD*), wobei in ein und demselben Datensatz ein Objekt in mehreren Detailstufen gleichzeitig repräsentiert sein kann. Die fünf Detaillierungsgrade, dargestellt in Abbildung 3.4, sind wie folgt definiert: LOD0 beschreibt ein 2.5-dimensionales digitales Geländemodell, eventuell überlagert mit einem Luftbild oder einer Karte. Ab LOD1 treten erstmals Gebäude in Erscheinung. Während sie in LOD1 noch als sogenannte Block- oder Klötzchenmodelle ohne Dachstrukturen und Texturen repräsentiert sind, erhalten sie im Detaillierungsgrad LOD2 bereits unterschiedliche Dachformen und können texturiert sein. Ab LOD2 umfassen 3D-Stadtmodelle zudem Vegetationsobjekte. Die Stufe LOD3 zeichnet sich durch Architekturmodelle mit detaillierten Fassaden- und Dachstrukturen aus, optional durch hoch aufgelöste Texturen angereichert. Begehbare Innenraummodelle mit explizit modellierten Stockwerken, Räumen, Türen, Möbeln etc. charakterisieren schließlich den Detaillierungsgrad LOD4. Zusätzlich zu Art, Ausprägung und Form der dargestellten Objekte definieren die einzelnen LODs auch deren Genauigkeit und die Mindestgröße der abzubildenden Details. In LOD1 ist eine Punktgenauigkeit von 5 m in Lage und Höhe gefordert; Objekte mit einer Grundfläche von mindestens $6\text{ m} \times 6\text{ m}$ müssen berücksichtigt werden. Für LOD2 lauten die entsprechenden Angaben 2 m (Lagegenauigkeit), 1 m (Höhengenauigkeit) sowie $4\text{ m} \times 4\text{ m}$ (Mindestgröße der Grundfläche) und für LOD3 gelten die Werte 0.5 m (Lage- und Höhengenaugkeit) sowie $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ (Mindestgröße der Grundfläche). LOD4-Modelle sind mit einer Genauigkeit von 0.2 m und besser anzugeben.

In derzeit verfügbaren 3D-Stadtmodellen gehören mit Ausnahme einiger weniger Landmarken, die mit großem Aufwand und in meist hohem Detailgrad manuell modelliert werden, die meisten Gebäudemodelle dem Detaillierungsgrad LOD2 an. Die Gebäude weisen zwar unterschiedliche Dachstrukturen auf, ihre Fassaden sind jedoch durch ebene Flächen repräsentiert und besitzen somit weder geometrische noch semantische Informationen. Ein möglicher Ansatz, entsprechende Gebäuderepräsentationen um die fehlenden Details zu ergänzen und damit einen effizienten Übergang von LOD2- nach LOD3-Modellen zu schaffen, wird in den folgenden Kapiteln vorgestellt.

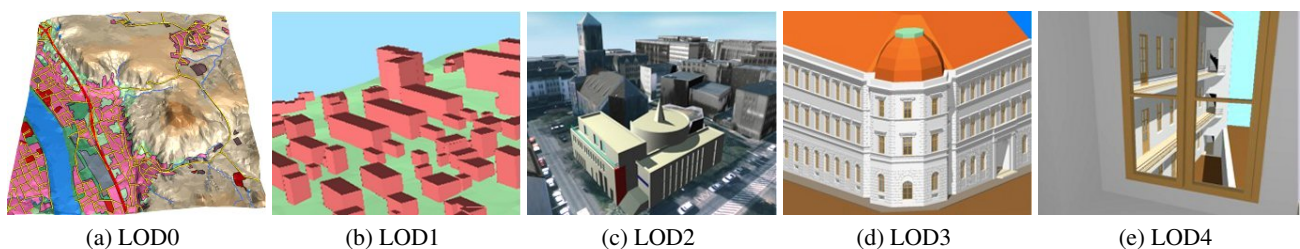


Abbildung 3.4: In CityGML definierte Detaillierungsgrade (aus Gröger et al. (2008)).

4 Datengetriebene 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 LOD2-Gebäudemodelle (Haala et al., 2006; Becker und Haala, 2007b, 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. Bezüglich der in Abschnitt 2.1 eingeführten Begrifflichkeiten konzentriert sich die Fassadenrekonstruktion hier also auf „funktionale“ Elemente der „Gestaltungsstufen“ 1 bis 3.

Die Rekonstruktion basiert auf der Zellenzerlegung (siehe Abschnitt 3.3), einem Prinzip, das sich effizient für die Modellierung topologisch korrekter 3D-Gebäudemodelle einsetzen lässt. Demonstriert wurde dies bereits für die Gebäudegeneralisierung durch Kada (2006). Wie gezeigt werden wird, lässt sich die Zellenzerlegung 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 4.1 veranschaulicht. Aus der Menge der LiDAR-Punkte werden in einem ersten Schritt diejenigen Punkte extrahiert, die an den Begrenzungen von Fenstern und Türen gemessen wurden (Abbildung 4.1a). Auf Basis der gefundenen Kantenpunkte werden anschließend horizontale und vertikale Kantenlinien abgeleitet (Abbildung 4.1b). 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 4.1c). Um aus der Ansammlung von Wand- und Fensterzellen ein explizites 3D-Fassadenmodell zu erhalten, werden alle Fensterzellen entfernt und die verbleibenden Wandzellen verschmolzen (Abbildung 4.1d). Dünne Strukturen wie zum Beispiel Fenstersprossen, die in der LiDAR-Punktwolke infolge eines zu großen Abtastabstandes eventuell nicht repräsentiert sind, können durch die Integration höher aufgelöster Bilddaten rekonstruiert werden (Abbildung 4.1e). Eine ausführliche Beschreibung der einzelnen Verfahrensschritte ist in den nachfolgenden Abschnitten zu finden. Behandelt wird zunächst die Rekonstruktion von Fassadeneinbuchtungen wie Fenstern oder Türen. In den Abschnitten 4.1 bis 4.5 wird dabei „Fenster“ als Oberbegriff für Fassadenvertiefungen verwendet. Die Modellierung von Gebäudevorsprüngen ist Gegenstand des Abschnitts 4.5.2. Die optionale bildbasierte Verfeinerung wird in Abschnitt 4.6 thematisiert. Ergebnisse der Rekonstruktion werden in den Abschnitten 4.7 und 4.8 dargestellt beziehungsweise diskutiert.

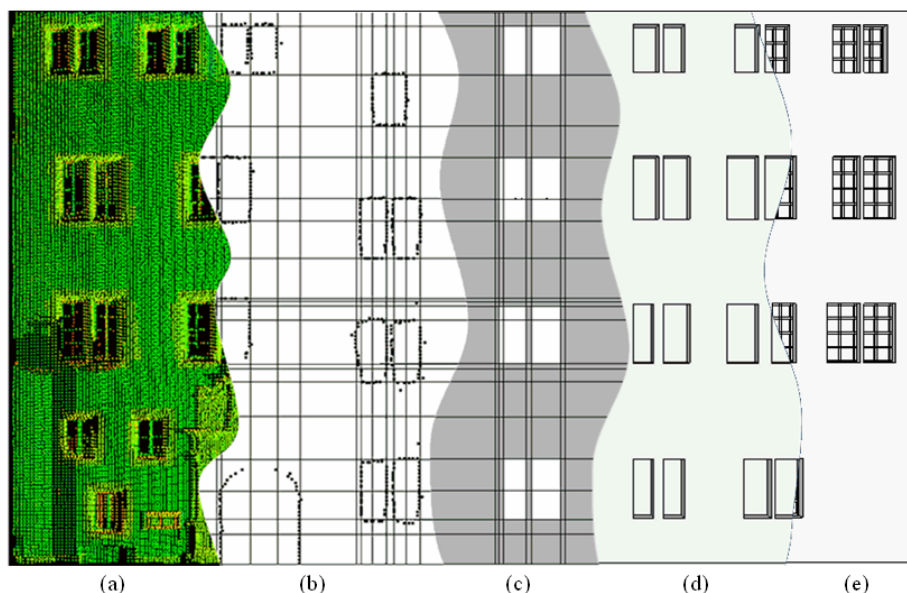


Abbildung 4.1: Unterschiedliche Stadien der datengetriebenen Fassadenrekonstruktion am Beispiel der Alten Kanzlei: LiDAR-Punktwolke (a), detektierte Kantenpunkte und -linien (b), klassifizierte Wandzellen (grau) und Fensterzellen (weiß) (c), 3D-Fassadenmodell (d), verfeinertes 3D-Fassadenmodell (e).

4.1 Klassifizierung der 3D-Punkte

Um die in der LiDAR-Punktwolke enthaltene räumliche Information für die geometrische Anreicherung einer Gebäudefassade nutzen zu können, müssen zunächst die 3D-Punkte bestimmt werden, die für die zu rekonstruierenden Fassadenstrukturen relevant sind. Die 3D-Punkte werden hierfür in zwei Schritten klassifiziert: Eine Grobklassifizierung (Abschnitt 4.1.1) ermöglicht die Selektion derjenigen Punkte, die im Bereich der betreffenden Fassade gemessen wurden; in einer anschließenden Feinklassifizierung (Abschnitt 4.1.2) werden diese entsprechend ihres Abstands zur Fassade weiter unterteilt.

4.1.1 Grobklassifizierung von Fassadenpunkten

Nach der Georeferenzierung der gemessenen LiDAR-Punktwolke und des Stadtmodells (Abschnitt 3.2.4) liegen die 3D-Punkte und die groben Gebäudemodelle in einem gemeinsamen Koordinatensystem vor. Abbildung 4.2a zeigt beispielhaft die am Stuttgarter Schillerplatz mit dem Leica-Scanner HDS3000 aufgenommene Punktwolke, überlagert mit den LOD2-Gebäudemodellen des Stadtmodells. Spezifikationen und Genauigkeitsangaben dieses Scanners sowie weiterhin in dieser Arbeit eingesetzter mobiler Laserscanner-Systeme können in Abschnitt 3.1 nachgelesen werden. Die Selektion der Punkte, die sich im Bereich einer zu verfeinernden Fassade befinden, ist vollautomatisch durchführbar. Dazu muss lediglich um die jeweilige Fassade ein Pufferbereich gelegt werden, um danach die darin enthaltenen 3D-Punkte auszuwählen. Die Ausdehnung des Pufferbereichs senkrecht zur Fassade wird durch Schwellwerte festgelegt, die sich zum einen an der Tiefe der zu rekonstruierenden Fassadeneinbuchtungen beziehungsweise -vorbauten orientieren und zum anderen die Genauigkeit der 3D-Punkte berücksichtigen. Die Genauigkeit von Punktwolken wird in Abschnitt 4.8.1 diskutiert. Setzt sich eine Fassade eines LOD2-Gebäudemodells - bedingt durch einen hohen Detailgrad des zugrunde liegenden Gebäudegrundrisses - aus mehreren Flächensegmenten zusammen, wird für jedes dieser Flächenstücke ein eigener Pufferbereich generiert. Der Detailgrad des Grundrisses hat somit Einfluss auf die Rekonstruktion. Kleine Flächensegmente umfassen nur wenige Strukturelemente wie etwa Fenster oder Türen. Nachbarschaftsbeziehungen oder übergeordnete Fassadenstrukturen wie zum Beispiel die exakte Ausrichtung von Fenstern in einer Zeile (Abschnitt 4.3.2) können folglich für eine Stabilisierung der Rekonstruktion nicht oder nur bedingt genutzt werden. Aus diesem Grund bietet es sich an, stark zerstückelte Fassaden im

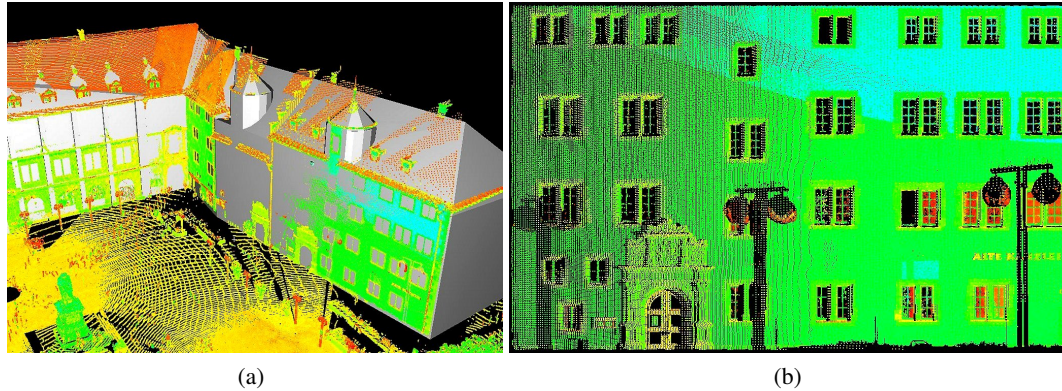


Abbildung 4.2: Datensatz Schillerplatz mit Alter Kanzlei: 3D-Punktwolke (erfasst durch Leica HDS 3000) überlagert mit LOD2-Gebäudemodellen aus Stadtmodell (a), selektierte 3D-Punkte für die Frontfassade der Alten Kanzlei (b).

Vorfeld zu generalisieren (Kada, 2006; Haala et al., 2006), um so größere zusammenhängende Fassadenbereiche zu schaffen. Grundrissdetails, die dadurch verloren gehen, können innerhalb der Fassadenrekonstruktion wiederhergestellt werden. Alle nachfolgenden Betrachtungen beziehen sich auf die geometrische Anreicherung eines einzelnen Fassadensegments. Die für die Frontfassade der Alte Kanzlei selektierten 3D-Punkte sind in Abbildung 4.2b zu sehen.

Nachdem die relevanten 3D-Punkte bestimmt sind, werden sie durch eine Ebene approximiert, die im Folgenden als Referenzebene bezeichnet wird. Zur Ermittlung der Ebenenparameter wird ein robustes Schätzverfahren angewendet, das auf dem RANSAC-Algorithmus (*engl.: Random Sample Consensus*) (Fischler und Bolles, 1981) beruht. Aus der Punktmenge werden beliebig oft jeweils drei Punkte zufällig ausgewählt. Jedes Punktetripel legt eindeutig eine Ebene fest, die einen möglichen Kandidaten für die gesuchte Referenzebene darstellt. Aus allen berechneten Ebenen wird schließlich der Kandidat als Referenzebene angenommen, der in einem vorgegebenen Schwellwertbereich in und entgegen der Ebenennormalen die meisten 3D-Punkte enthält. Ungenauigkeiten in Position und Orientierung des groben Gebäudemodells, beispielsweise verursacht durch eine Generalisierung, können dazu führen, dass die Referenzebene der LiDAR-Punkte und das zu verfeinernde Fassadenpolygon nicht exakt dieselbe Ebene beschreiben. Das grobe Gebäudemodell wird daher so rotiert und verschoben, dass das Fassadenpolygon auf der Referenzebene zu liegen kommt.

Die Referenzebene definiert ein lokales kartesisches Linkshand-Koordinatensystem, dessen Ursprung durch den Mittelpunkt des Fassadenpolygons gegeben ist. Die z -Achse verläuft parallel zur Ebenennormalen und weist ins Gebäudeinnere; die x - und die y -Achse liegen in der Referenzebene, wobei die y -Achse senkrecht nach oben zeigt. Die Fassadenfläche markiert die Ebene $z = 0$. Nach der Transformation der Punkte und des Gebäudemodells in das lokale Fassadenkoordinatensystem lassen sich die zu rekonstruierenden Einbuchtungen und Vorbauten als Variation der z -Koordinate in Abhängigkeit der xy -Position auf der Fassade beschreiben. Um die Ausdehnung der entsprechenden Strukturen senkrecht zur Fassadenebene aus den 3D-Punkten abzuleiten, genügt es, deren z -Koordinaten zu betrachten.

4.1.2 Feinklassifizierung

Die in Abschnitt 4.1.1 selektierten 3D-Punkte (Abbildung 4.2b) weisen typische Eigenschaften einer Punktwolke auf, die durch terrestrisches Laserscanning im Bereich einer Fassade entstanden ist. Charakteristisch ist insbesondere die Punkteverteilung. Während Wandbereiche durch eine überwiegend gleichmäßige und dichte Punktabdeckung geprägt sind, enthalten Fensterregionen nur wenige und unregelmäßig verteilte 3D-Punkte. Dies ist auf die unterschiedlichen Rückstrahleigenschaften von Glas und Mauerwerk zurückzuführen. Wandbereiche, die für den Laser

undurchlässig sind, werfen die auftreffende Strahlung zurück und stellen somit eine geschlossene Reflexionsfläche dar. Im Gegensatz dazu wird Glas von Laserstrahlen durchdrungen. Die gemessenen 3D-Punkte repräsentieren Objekte im Gebäudeinnern, die, je nachdem wie weit sie sich hinter der Referenzebene befinden, bereits durch die Grobklassifizierung (Abschnitt 4.1.1) aussortiert werden können. Weitere, in Fensterbereichen erfasste 3D-Punkte stammen von Laibungen, Fensterrahmen und Fenstersprossen, die in der Regel hinter der Fassadenebene liegen. Dasselbe gilt für Punktbeobachtungen an Türen, die ebenfalls bezüglich der Fassadenebene nach hinten versetzt sind. Auf Basis der senkrechten Punktabstände zur Referenzebene erfolgt die Feinklassifizierung der vorselektierten Punktwolke in *Fassadenpunkte* und *Nicht-Fassadenpunkte*. Fassadenpunkte sind diejenigen Punkte, die sich auf der Referenzebene befinden. Ebenso gelten alle Punkte vor der Referenzebene als Fassadenpunkte; sie werden erst später gesondert behandelt, wenn es um die Modellierung von Gebäudevorbauten geht (Abschnitt 4.5.2). Alle übrigen Punkte, die hinter der Referenzebene liegen, werden als Nicht-Fassadenpunkte interpretiert. Fenster und Türen stellen somit Löcher in der Menge der Fassadenpunkte dar. Prinzipiell können größere Lücken in der Punktwolke auch die Folge von Verdeckungen sein. Daher empfiehlt sich die Aufnahme von mehreren Standpunkten. Im Idealfall schatten die Sicht Hindernisse in den einzelnen Scans jeweils unterschiedliche Fassadenbereiche ab, so dass nach Zusammenführung der Punktwolken in den betreffenden Fassadenbereichen lediglich reduzierte Punktdichten zu beobachten sind, nicht aber völlig punktfreie Bereiche. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 4.2b zu sehen. Die dargestellte Punktwolke ist das Ergebnis zweier, von unterschiedlichen Standpunkten aus durchgeführten Scans. Der durchschnittliche Punktabstand in verdeckungsfreien Wandregionen beträgt 4 cm; in den durch Straßenlaternen partiell abgeschatteten Bereichen bewegen sich die Punktabstände zwischen 10 und 18 cm.

4.2 Erzeugung von 3D-Zellen

Die in Abschnitt 4.1 in Fassadenpunkte und Nicht-Fassadenpunkte segmentierte Punktwolke ist der Ausgangspunkt für die Generierung von 3D-Zellen, die die wesentlichen Fassadenstrukturen geometrisch und semantisch bestmöglich beschreiben. Zunächst werden Fensterkanten extrahiert (Abschnitt 4.2.1). Sie definieren die Teilungsebenen, die für die anschließende Zellenzerlegung verwendet werden (Abschnitt 4.2.2).

4.2.1 Detektion von Kantenpunkten

Gesucht sind diejenigen 3D-Punkte, die sich an den Begrenzungen von Fenstern und Türen befinden. Sie lassen sich detektieren, indem in der Menge der Fassadenpunkte nach „Löchern“ gesucht wird. Diese Vorgehensweise beruht auf folgenden Annahmen:

- Annahme 1: Wandregionen sind durch gleichmäßig verteilte Fassadenpunkte repräsentiert.
- Annahme 2: Fensterbereiche enthalten keine Fassadenpunkte.

Sobald eine der beiden Annahmen nicht erfüllt ist, kann der hier vorgestellte datengetriebene Ansatz fehlerhafte Rekonstruktionen liefern. Um unabhängig von der Datenqualität auch in solchen Fällen realistische Fassadenstrukturen erzeugen zu können, ist die Integration von Modellwissen notwendig. Entsprechende Verfahren werden innerhalb der grammatikbasierten Fassadenrekonstruktion in den Abschnitten 6.3 und 6.4 vorgestellt.

Die Suche nach Kantenpunkten beschränkt sich zunächst auf solche Punkte, die an horizontalen und vertikalen Kanten erfasst wurden; anders geartete Fensterbegrenzungen wie beispielsweise Rundbögen werden in einem Verifikationsschritt (Abschnitt 4.4) gesondert behandelt. Je nachdem, ob ein 3D-Punkt die obere, untere, linke oder rechte Kante eines Fensters repräsentiert, spricht man von einem *oberen*, *unteren*, *linken* oder *rechten Kantenpunkt*. Jeder Fassadenpunkt wird daraufhin getestet, ob er zu einer der vier Kantenpunkt-Kategorien gehört. Ein linker Kantenpunkt liegt beispielsweise dann vor, wenn sich innerhalb eines bestimmten Suchradius kein weiterer Fassadenpunkt rechts davon befindet. Die Detektion von rechten, oberen und unteren Kantenpunkten verläuft analog. Entscheidend für den Erfolg der Kantensuche ist die Wahl des Suchradius. Ist dieser zu klein, wächst in

Bereichen geringer Punktdichte die Anzahl der fälschlicherweise detektierten Kantenpunkte. Ein zu großer Suchradius hingegen kann dazu führen, dass kleine Fensterobjekte unerkannt bleiben. Als sinnvoll hat sich ein Suchradius erwiesen, der mindestens das Doppelte des Abtastabstands bezüglich der Referenzebene darstellt und gleichzeitig kleiner als die halbe Ausdehnung der kleinsten zu rekonstruierenden Fassadenstrukturen ist. Mathematisch ausgedrückt bedeutet dies

$$2d \leq r_{\text{such}} \leq \frac{1}{2}s_{\text{min}}, \quad (4.1)$$

wobei r_{such} den Suchradius, d den Abtastabstand und s_{min} die Größe der kleinsten nachzubildenden Fassadenstruktur beschreibt. Abbildung 4.3 zeigt einen Ausschnitt der für die Alte Kanzlei erfassten 3D-Punkte. Zu sehen sind die in Abschnitt 4.1 extrahierten Fassadenpunkte im Bereich eines Fensters (Abbildung 4.3a) und die dort gefundenen Kantenpunkte (Abbildung 4.3b). Zur Veranschaulichung der Kantensuche sind in Abbildung 4.3a für zwei beispielhafte Punkte die Suchmasken zur Detektion eines linken Kantenpunktes eingezeichnet. Ein solcher liegt dann vor, wenn der schraffierte Teil der Suchmaske frei von Fassadenpunkten ist. Während der untere der beiden betrachteten Fassadenpunkte korrekt als Kantenpunkt identifiziert werden kann, ist der obere Punkt, der in der Fensterecke gemessen wurde, in der Menge der Kantenpunkte nicht enthalten. Die Tatsache, dass Eckpunkte in den Fassadenpunkten nicht gefunden werden, ist eine logische Konsequenz des vorgestellten Verfahrens. Sobald zwei Kanten senkrecht aufeinandertreffen, befinden sich im vorgegebenen Suchbereich (schraffierte Fläche in Abbildung 4.3a) weitere Fassadenpunkte, wodurch das Kriterium eines Kantenpunktes nicht mehr erfüllt ist. Wird der Suchbereich innerhalb der Suchmasken jeweils auf die Größe eines Viertelkreises verkleinert, lassen sich auch solche Eckpunkte detektieren. Solange jedoch die Kanten durch genügend Punkte erfasst sind, ist dies nicht zwingend notwendig, da sich die die Positionen der Fensterecken durch den Schnitt von Kantenlinien automatisch ergeben.

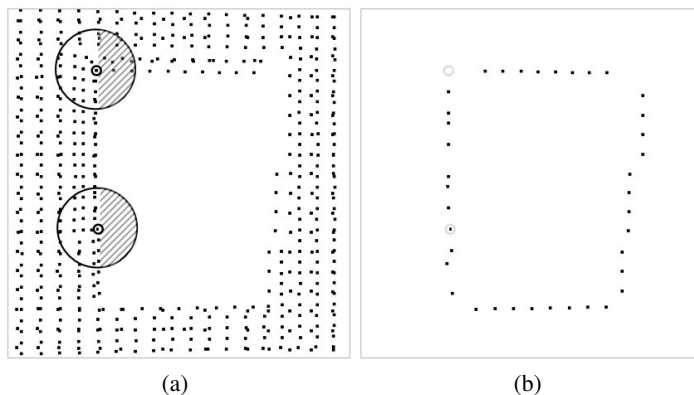


Abbildung 4.3: Suche nach Kantenpunkten: Fassadenpunkte und beispielhafte Suchmasken (a), detektierte Kantenpunkte (b).

Für eine schnelle und optimierte Suche nach Kantenpunkten, werden die Fassadenpunkte in sogenannten *Spalten- und Zeilenlisten* verwaltet. Auf diese Weise soll eine aufwendige Bestimmung von Punktnachbarschaften vermieden werden. Dazu wird die Fassade zunächst in sich jeweils überlappende Spalten und Zeilen aufgeteilt. Die Ausdehnung dieser horizontalen und vertikalen Bänder sowie deren Überlappung wird so gewählt, dass auf die im Suchbereich liegenden Nachbarpunkte möglichst effizient zugegriffen werden kann. Sinnvoll ist, die Breite der Spalten und die Höhe der Zeilen auf das Dreifache des Suchradius festzulegen bei einer Überlappung der vertikalen beziehungsweise horizontalen Bänder von zwei Dritteln. Gemäß ihrer Position auf der Fassade werden die Punkte den entsprechenden Listen zugewiesen und dort nach ihren y-Koordinaten im Fall einer Spaltenliste beziehungsweise nach ihren x-Koordinaten im Fall einer Zeilenliste sortiert. Für die Suche nach linken und rechten Kantenpunkten werden die Zeilenlisten nacheinander abgearbeitet. Aufgrund der Zweidrittelüberlappung benachbarter Zeilen müssen in jeder Zeilenliste lediglich die im mittleren Drittel liegenden Punkte betrachtet werden. Die spezielle Wahl der Zeilenhöhe garantiert, dass für diese Punkte der jeweilige Suchbereich nicht über die Zeile hinausragt. Die in Frage kommenden Nachbarn eines untersuchten Fassadenpunktes befinden sich folglich in derselben Zeile. Um zu entscheiden, ob es sich um einen linken oder rechten Kantenpunkt handelt, genügt es also,

den horizontalen Abstand zum nächsten beziehungsweise vorherigen Punkt in der Liste zu bestimmen. Ist dieser kleiner als der Suchradius, liegt kein Kantenpunkt vor. Die Suche nach oberen und unteren Kantenpunkten erfolgt auf Basis der Spaltenlisten in analoger Weise.

4.2.2 Zellenzerlegung

Die in Abschnitt 4.2.1 detektierten Kantenpunkte machen wesentliche Fassadenstrukturen sichtbar. Auf ihrer Basis lassen sich Teilungsebenen ableiten, die für die Zerlegung des groben Gebäudemodells in 3D-Zellen benötigt werden. Gesucht sind zunächst horizontale und vertikale Linien, die die Position der Kanten bestmöglich beschreiben. Für die Bestimmung der horizontalen Kantenlinien müssen lediglich die y -Koordinaten der oberen und unteren Kantenpunkte betrachtet werden. Prinzipiell stellt jede y -Koordinate eine Hypothese für eine horizontale Kantenlinie dar. Um jedoch eine Übersegmentierung zu vermeiden, werden ähnliche y -Werte über einen Clusterprozess zusammengefasst. Der maximal erlaubte Abstand von y -Koordinaten innerhalb eines Clusters stellt einen Parameter dar, über den sich der Grad der Vereinheitlichung festlegen lässt. Zudem kann eine Mindestanzahl von Punkten definiert werden, die ein Cluster aufweisen muss, um eine Kantenlinie zu bilden. Eine entsprechende Vorgehensweise wird ebenso bezüglich der vertikalen Kantenlinien angewandt. Abbildung 4.4 zeigt am Beispiel der Alten Kanzlei die detektierten Kantenpunkte und die daraus ermittelten Kantenlinien.

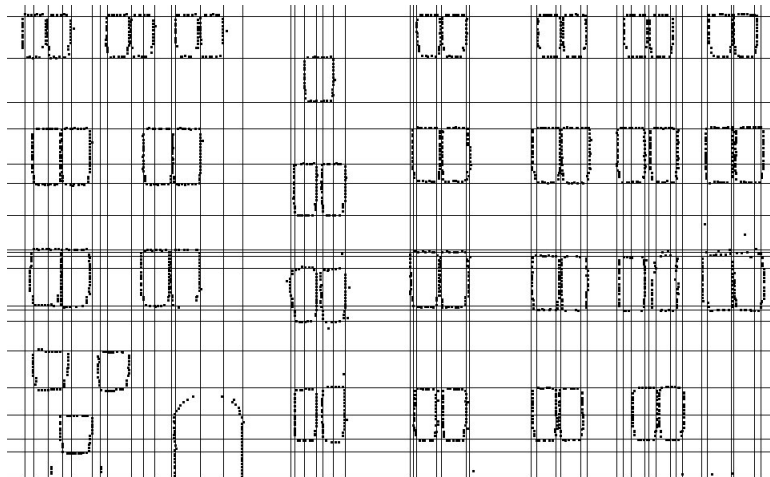


Abbildung 4.4: Detektierte Kantenpunkte und daraus abgeleitete Kantenlinien.

Jede Kantenlinie definiert eine Teilungsebene, die auf der Fassadenebene senkrecht steht. Bezogen auf das 3D-Fassadenkoordinatensystem (Abschnitt 4.1.1) begrenzen sie die Fassadenstrukturen in x - und y -Richtung. Um auch die Ausdehnung in z -Richtung und damit die Tiefe von Fenster- und Türobjekten festzulegen, wird eine zusätzliche Teilungsebene benötigt, die zur Referenzebene parallel ist. Zu ihrer Bestimmung kommt ein Plane-Sweep-Verfahren zum Einsatz. Dazu wird eine zur Fassadenebene parallele Sweep-Plane $P : z = d$ in Normalenrichtung von hinten nach vorne über das Gebäude bewegt. Für jede Position d mit $z_{\min}^{\text{Fassade}} \leq d \leq z_{\max}^{\text{Fassade}}$ wird aus den senkrechten Abständen der Punkte zur Ebene eine Standardabweichung berechnet. In die Betrachtung werden hier ausschließlich die Nicht-Fassadenpunkte einbezogen, also diejenigen Punkte, die während der Feinklassifizierung (Abschnitt 4.1.2) als hinter der Fassadenebene liegend identifiziert wurden. Unter der Annahme, dass die Mehrheit dieser Punkte an rückwärtigen Fensterelementen wie Rahmen oder Sprossen gemessen wurde, stellt die Sweep-Plane mit der kleinsten Standardabweichung die gesuchte Teilungsebene dar.

Die eigentliche Zellenzerlegung erfolgt, indem das grobe Gebäudemodell entlang aller gefundenen Teilungsebenen geschnitten wird. Im Bereich der Fassade entstehen quaderförmige 3D-Zellen, welche die in den Kantenpunkten und Nicht-Fassadenpunkten enthaltenen Strukturinformationen wiedergeben. Es handelt sich hier zunächst um rein geometrisches Wissen; die Anreicherung um Semantik, das heißt die Kenntnis, ob die einzelnen Zellen Wand- oder Fensterpartien repräsentieren, ist Aufgabe der im nächsten Abschnitt beschriebenen Klassifizierung.

4.3 Klassifizierung von 3D-Zellen

Die Menge der 3D-Zellen kann unterteilt werden in *Fassadenzellen* und *Gebäudezellen*. Ausschlaggebend ist die Lage der Zellen bezüglich der Referenzebene. *Fassadenzellen* werden diejenigen 3D-Körper genannt, die an die Frontfassade grenzen und somit Teil der zu rekonstruierenden Fassadengeometrie sind. Unter dem Begriff *Gebäudezellen* werden alle übrigen 3D-Zellen zusammengefasst; sie beschreiben den Gebäudekörper und sind für die Fassadenmodellierung nicht relevant. Hierfür kommen lediglich die Fassadenzellen in Betracht. Diese beschreiben entweder Wandsegmente der Fassade oder Fensterpartien. Eine entsprechende Klassifizierung in *Wand-* und *Fensterzellen* erfolgt in zwei Stufen. Zunächst werden die 3D-Zellen auf Basis der beobachteten Fassadenpunkte klassifiziert (Abschnitt 4.3.1). Zellen, für die diese Datengrundlage keine sichere Zuweisung zu einer der beiden Klassen erlaubt, werden anschließend gesondert behandelt, indem Nachbarschaftsbeziehungen und geometrische Bedingungen in den Entscheidungsprozess einbezogen werden (Abschnitt 4.3.2).

4.3.1 Grobklassifizierung von Zellen

Für die Klassifizierung der 3D-Zellen in Wand- und Fensterzellen wird die prozentuale Flächenabdeckung durch Fassadenpunkte pro Zelle ermittelt. Dieses Entscheidungskriterium basiert auf den in Abschnitt 4.2.1 formulierten Annahmen. Demnach sind korrekte Klassifikationsergebnisse dann zu erwarten, wenn es sich bei Fenstern um punktfreie Bereiche handelt, während Wandregionen gleichmäßig mit Fassadenpunkten überdeckt sind. Neben Fassadenunebenheiten wie zum Beispiel stark „bewegtes“ Mauerwerk oder reliefartige Verzierungen verhindern jedoch weitere Einflüsse wie etwa schräge Aufnahmewinkel durchgehend gleichmäßige Abstände der in Wandbereichen gemessenen Laserpunkte. Einfache Verfahren zur Bestimmung der Punktabdeckung, die unter der Voraussetzung einer gitterförmigen Punkteverteilung auf der Fassade lediglich die Anzahl tatsächlich beobachteter Fassadenpunkte zu der Anzahl freier Gitterplätze ins Verhältnis setzen müssen, können somit nicht angewendet werden. Um die Überdeckung der Zellen durch Fassadenpunkte dennoch in ähnlicher Weise effektiv auswerten zu können, wird die Fassadenpunktinformation in einer Bildmatrix abgelegt. Dazu wird die gesamte Fassade mit einem regelmäßigen Raster überzogen, wobei jedes Rasterelement auf ein Pixel der Bildmatrix verweist. Anschließend werden die Fassadenpunkte senkrecht auf die Fassadenebene projiziert. Bildpixel, deren zugehörige Gitterelemente auf der Fassade keine Punkte enthalten, werden mit dem Wert eins belegt und als *Fensterpixel* interpretiert. Alle anderen Pixel werden auf null gesetzt; sie stellen die *Wandpixel* dar. Es entsteht ein Binärbild, das die Verfügbarkeit von Fassadenpunkten an der Gebäudefront anzeigt. Im Folgenden wird es als *Punkteverfügbarkeitskarte* bezeichnet. Der Wahl einer geeigneten Pixelgröße beziehungsweise Gitterweite auf der Fassade gehen ähnliche Überlegungen voraus wie der Festlegung des Suchradius für die Detektion von Kantenpunkten (Abschnitt 4.2.1). Eine Rasterweite, die im Verhältnis zur Punktdichte zu klein ist, führt zu falschen Fensterpixeln in Wandregionen, während zu große Gitterzellen Form und Ausdehnung von Fensterobjekten nur ungenau wiedergeben. Gute Resultate ergeben sich, wenn die Rastergröße dem Suchradius angepasst wird. Abbildung 4.5a zeigt die Punkteverfügbarkeitskarte für den Datensatz Alte Kanzlei. Die Pixelgröße entspricht einer Gitterweite von 10cm auf der Fassade. Vereinzelt falsche Fensterpixel, wie sie in den durch Straßenlaternen teilweise abgeschatteten Fassadenbereichen entstanden sind, lassen sich durch die Anwendung des morphologischen Operators „Schließen“ (*engl.: closing*) in korrekte Wandpixel überführen. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.5b zu sehen.

Auf Basis der Punkteverfügbarkeitskarte kann nun die Klassifizierung der 3D-Zellen sehr einfach erfolgen. Durch Projektion in die Karte wird für jede Zelle der entsprechende Bildbereich ermittelt und der prozentuale Anteil der darin liegenden Wandpixel berechnet. Als Folge der groben Rastereinteilung repräsentiert die Karte Position und Ausdehnung von Fenstern wesentlich ungenauer als die Aufteilung in 3D-Zellen. Vor allem an den Rändern einer ins Bild projizierten 3D-Zelle kommt es daher üblicherweise zu Ungenauigkeiten. Aus diesem Grund werden die Pixel, die sich in der Mitte einer betrachteten Bildregion befinden, über eine quadratische Gewichtungsfunktion höher gewichtet als die Randpixel. Der Einfluss ungenauer Fensterbegrenzungen im Bild bleibt somit gering.

Zellen, die zu mehr als 70 % mit Wandpixeln überdeckt sind, werden als Fassadenzellen interpretiert. Liegt die Abdeckungsrate unter 10 %, geht man von Fensterzellen aus. Mit Hilfe dieser Schwellwerte kann ein Großteil der



Abbildung 4.5: Punktevorgängerkarte vor der Anwendung des morphologischen Operators „Schließen“ (a) und danach (b). Wandpixel sind schwarz, Fensterpixel weiß.

Zellen zuverlässig klassifiziert werden. Alle übrigen Zellen, deren prozentualer Anteil von Wandpixeln keinem dieser Wertebereiche angehört, werden zunächst mit dem Prädikat „unsicher“ versehen. Sie werden im nächsten Abschnitt gesondert behandelt. Abbildung 4.6a veranschaulicht das Ergebnis der Grobklassifizierung. Fassadenzellen sind in Grau, Fensterzellen in Weiß und unsichere Zellen in Schwarz dargestellt.

4.3.2 Feinklassifizierung durch geometrische Bedingungen

Wie in Abbildung 4.6a zu sehen ist, sind die als unsicher bezeichneten Zellen oft sehr schmal und treten überwiegend in Randbereichen von Fensterobjekten auf. Da sie sich auf Basis der vorliegenden Fassadenpunktinformation nicht zuverlässig klassifizieren lassen, werden über heuristische Regeln Nachbarschaftsbeziehungen in den Entscheidungsprozess miteinbezogen. Gleichzeitig werden an die Form der resultierenden Fensterobjekte geometrische Bedingungen gestellt mit dem Ziel, realistische und möglichst einfache Fensterformen zu erzeugen. Die Verifikation beziehungsweise Verfeinerung dieser einfachen Fensterformen ist Thema des Abschnitts 4.4. Die Regeln und einzuhaltenden Bedingungen werden im Folgenden diskutiert. Das Ergebnis ihrer Anwendung enthält Abbildung 4.6b.

Befindet sich eine unsichere Zelle zwischen zwei Fensterzellen, wird sie als Wandzelle interpretiert. Diese Regel geht darauf zurück, dass oftmals der Abtastabstand der Laserpunkte auf der Fassade zu groß ist, um auch schmale, zwischen zwei Fenstern liegende Fassadenbereiche durch eine genügend große Anzahl von 3D-Punkten zu erfassen. Als Folge werden entsprechende 3D-Zellen zunächst als unsicher gekennzeichnet. Da es sich jedoch bei den wenigen, dort vorhandenen 3D-Punkten um relevante Fassadenpunkte handelt, kann der einzig zulässige Schluss die Klassifikation als Wandzelle sein. In Abbildung 4.6a tritt die beschriebene Zellenkonfiguration an mehreren Stellen auf, so zum Beispiel gleich drei Mal in der obersten Fensterreihe.

Unsichere Zellen, die lediglich eine Fensterzelle als Nachbarn haben, befinden sich entweder im oberen, unteren, linken oder rechten Randbereich eines Fensterobjekts. Um über sie zu entscheiden, werden bereits als sicher klassifizierte Zellen betrachtet, die in derselben Zeile beziehungsweise Spalte liegen und ebenfalls den Randbereich eines Fensterobjekts - sei es als Fensterzelle oder als Wandzelle - definieren. Zum Beispiel werden für die Klassifizierung einer unsicheren Zelle, die den unteren Randbereich eines Fensterobjekts beschreibt, alle sicher klassifizierten Zellen derselben Zeile untersucht. Relevant sind davon die Zellen, die ebenso wie die unsichere Zelle eine Wandzelle als unteren und eine Fensterzelle als oberen Nachbarn haben. Aus der Menge der für die Klassifizierung als relevant eingestuften Zellen gibt diejenige den Typ für die unsichere Zelle vor, die dieser am nächsten liegt. Wird keine Zelle mit derselben Konstellation wie die der unsicheren Zelle gefunden, erfolgt die Zuweisung zur Klasse der Wandzellen. In analoger Weise läuft die Klassifizierung von unsicheren Zellen in oberen, linken und rechten Fensterbereichen ab. Durch die Berücksichtigung benachbarter Fensterkonfigurationen können kleine Unterschiede in

den Fensterabschlüssen innerhalb von Fensterzeilen oder -spalten ausgeglichen werden. Entsprechende Beispiele sind in Abbildung 4.6a zu sehen.

Nachdem die unsicheren Zellen klassifiziert sind, werden benachbarte Fensterzellen zusammengefasst, so dass die semantische Einheit eines Fensterobjekts durch nur eine einzige Fensterzelle repräsentiert ist. An die Geometrie der resultierenden Fensterzellen wird dabei die Bedingung gestellt, dass der Verschmelzungsprozess ausschließlich konvexe Fensterformen hervorbringt. Daher wird für benachbarte Fensterzellen jeweils der minimal umschließende Quader ermittelt. Alle Fassadenzellen, die sich innerhalb dieses Quaders befinden, werden in Fensterzellen umgewandelt. Beispiele, in denen eine konvexe Fensterform auf diese Weise künstlich erzwungen wird, sind in Abbildung 4.6b im Bereich der Tür und bei einigen Fenstern auf der rechten Fassadenseite zu finden.

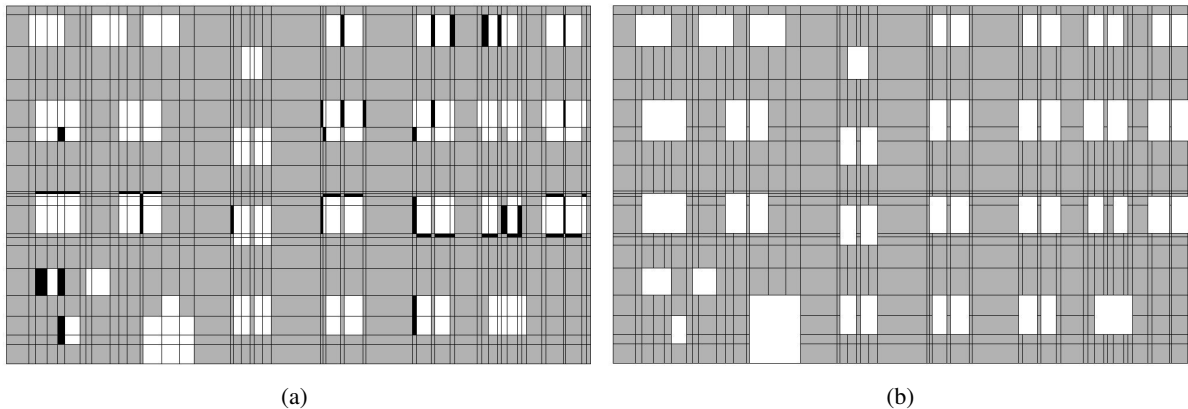


Abbildung 4.6: Ergebnis der Grobklassifizierung (a) und der anschließenden Verfeinerung durch heuristische Regeln (b). Fassadenzellen sind grau, Fensterzellen weiß, unsichere Zellen schwarz.

4.4 Verifikation der Strukturen

Aus dem bisher beschriebenen Verfahren gehen ausschließlich Fassadenstrukturen hervor, die sich aus den vorhandenen quaderförmigen 3D-Zellen zusammensetzen lassen. Gekrümmte, schräge oder sehr dünne Formen, die sich in der Zellenzerlegung nicht wiederfinden, werden demnach nicht modelliert. Um das Rekonstruktionsergebnis an die Realität anzupassen, muss daher die Zellenzerlegung lokal verändert werden; das heißt, Fensterzellen, die als Resultat der Feinklassifizierung jeweils ein Fensterobjekt beschreiben (Abbildung 4.6b: weiße Zellen), sind gegebenenfalls durch eine andere, passendere Zellenkonfiguration zu ersetzen. Zu diesem Zweck werden Hypothesen über mögliche Fensterstrukturen aufgestellt, die dann auf Basis der im jeweiligen Fensterbereich beobachteten Fassadenpunkte angenommen oder verworfen werden. Das hier eingebrachte Modellwissen trägt zur Stützung des Rekonstruktionsprozesses bei. Dies ist notwendig, da die Anzahl und Dichte der Fassadenpunkte an dünnen Wandelementen und in den Randbereichen der Fenster oftmals für eine stabile 3D-Rekonstruktion nicht ausreicht.

Den Hypothesen liegen Annahmen über unterschiedliche Fensterformen und -aufteilungen zugrunde, die zunächst jeweils als parametrisches Modell formuliert werden. Nach der Bestimmung der Parameterwerte aus den gemessenen Fassadenpunkten können die entsprechenden 3D-Geometrien erzeugt werden. Sie ersetzen die ursprüngliche Fensterzelle. Auf diese Weise entsteht für jede Modellannahme im Bereich des Fensterobjekts eine eigene Zellenkonfiguration, die es mit der originalen Fensterzelle zu vergleichen gilt. Für jede Zellenanordnung wird die Übereinstimmung mit der Realität überprüft. Als Qualitätsmaß kann zum Beispiel die Quadratsumme der senkrechten Abstände aller im Fensterbereich liegender 3D-Punkte von der rekonstruierten *Fassadenfläche* dienen. Unter der Fassadenfläche wird hierbei diejenige Oberfläche verstanden, die sich nach Weglassen der Fensterzellen aus den verbleibenden Wand- und Gebäudezellen ergibt. In der Regel sind die beobachteten 3D-Punkte in Fensterregionen sehr unregelmäßig verteilt. Das berechnete Abstandsmaß spiegelt so die Qualität der generierten Fensterstruktur nur zum Teil wider. Eine homogene Punkteverteilung lässt sich aus der in Abschnitt 4.3.1 erzeugten

Punkteverfügbarkeitskarte ableiten. Für jedes Pixel wird an der entsprechenden Stelle auf der Fassade ein 3D-Punkt erzeugt. Die xy -Position ergibt sich aus den Pixelkoordinaten. Die z -Koordinate wird auf null gesetzt, falls es sich um ein Wandpixel handelt, oder erhält den Wert der Fenstertiefe im Fall eines Fensterpixels. Als Grundlage für die Abstandsberechnungen ermöglichen diese rasterförmig angeordneten 3D-Punkte eine aussagekräftige Qualitätsbewertung der zu verifizierenden Zellenkonfiguration. Für ein Fensterobjekt wird die Zellenkonfiguration mit der kleinsten Abweichung beibehalten, alle anderen werden verworfen.

Prinzipiell lassen sich unendlich viele Hypothesen für die Struktur eines Fensterobjekts generieren. Die in den Abschnitten 4.4.1 und 4.4.2 diskutierten Aufteilungen und Formen stellen eine Auswahl der am häufigsten auftretenden Fensterausprägungen dar.

4.4.1 Fensteraufteilung

Jedes Fensterobjekt wird daraufhin untersucht, ob es eine Aneinanderreihung mehrerer dicht aufeinanderfolgender Einzelfenster beschreibt. Durch Zellenzerlegung kann eine solche Fensterkonfiguration nicht immer korrekt rekonstruiert werden. Probleme treten auf, wenn die Breite der zwischen den Fenstern liegenden Fassadenstücke kleiner ist als der Suchradius, der bei der Kantendetektion verwendet wird. Ein typisches Beispiel zeigt Abbildung 4.7a anhand eines Ausschnitts des Datensatzes Alte Kanzlei. Zu sehen sind die Kantenspunkte und die daraus entstandenen Zellenbegrenzungen. Wandflächen sind grau, Fensterregionen weiß dargestellt. Die Kantenspunkte der benachbarten Fensterränder liegen so dicht beieinander, dass sie durch eine gemeinsame Kantenlinie repräsentiert werden. Das schmale Wandelement findet sich somit in der Zellenzerlegung nicht wieder. Die Fensterzellen stoßen unmittelbar aufeinander und werden folglich zu einem großen Fensterobjekt verschmolzen (Abbildung 4.7b). Um derartige Rekonstruktionsfehler zu beseitigen, werden Hypothesen über mögliche Fensteraufteilungen generiert. Je nach Breite des zu prüfenden Fensterobjekts ist eine Gliederung in zwei, drei oder mehr Fenster denkbar. In dieser Arbeit werden Hypothesen für Fensterpaare formuliert. Feinere Unterteilungen lassen sich durch iterative Anwendung der Hypothesen auf die jeweils erzeugten Einzelfenster erreichen. Die im vorliegenden Beispiel akzeptierte Hypothese eines Fensterpaares ist in Abbildung 4.7c gegeben.

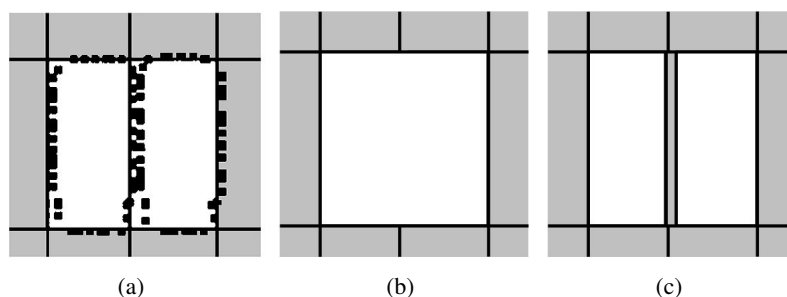


Abbildung 4.7: Verifikation eines Fensterpaares: Kantenspunkte und daraus resultierende Zellenzerlegung (a), Ergebnis der Feinklassifizierung (b), generierte Fensterpaar-Hypothese (c).

Die Hypothese für ein Fensterpaar wird aufgestellt, indem das ursprüngliche Fensterobjekt durch zwei quaderförmige Fensterzellen und eine dazwischen liegende Wandzelle ersetzt wird. Das substituierte Fensterobjekt, dessen Größe bekannt ist, wird dabei lückenlos ausgefüllt. Die Geometrie der neuen Zellenanordnung ist dadurch vollständig durch die Breite b_W und die x -Position x_W der Wandzelle beschrieben. Abbildung 4.8 veranschaulicht die Situation, wie sie sich in der zweidimensionalen Fassadenebene darstellt. Die Parameter b_W und x_W werden auf Basis der beobachteten Fassadenpunkte bestimmt. Zu diesem Zweck wird das originale Fensterobjekt zunächst in die Punkteverfügbarkeitskarte projiziert. Innerhalb eines Suchbereichs, der die Randregionen des Fensters ausspart, werden die Wandpixel ausgewertet. Für jede Spalte wird die Anzahl der im Suchbereich befindlichen Wandpixel ermittelt. Es entsteht ein Histogramm, das die Häufigkeit der Wandpixel in Abhängigkeit der x -Koordinaten anzeigt. Das globale Maximum des Histogramms definiert die x -Position x_W der 3D-Wandzelle. Die Breite b_W ergibt sich

aus der Länge des x -Bereichs, der um das Maximum herum durch Wandpixel besetzt ist. Unterschreitet das globale Maximum einen vorgegebenen Schwellwert, der sich an der y -Ausdehnung des Suchbereichs orientiert, wird keine weitere Aufteilung des betrachteten Fensterobjekts vorgenommen; eine Fensterpaar-Hypothese wird nicht erzeugt.

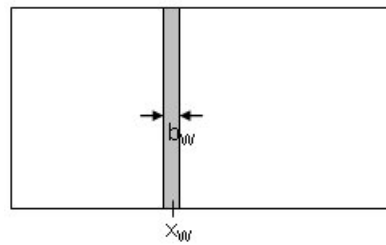


Abbildung 4.8: Hypothese über ein Fensterpaar (*Fensterzellen: weiß, Wandzellen: grau*).

4.4.2 Fensterform

Die bisher erzeugten Fensterobjekte weisen grundsätzlich rechteckige Formen auf, die nicht zwangsläufig mit der Realität übereinstimmen. Gebogene oder schräge Fensterbegrenzungen lassen sich nicht durch die bei der Zellenzerlegung verwendeten horizontalen und vertikalen Schnittebenen erzeugen. Ein Beispiel hierfür ist im Datensatz Alte Kanzlei im Türbereich zu sehen. Abbildung 4.9a zeigt den entsprechenden Ausschnitt der Zellenzerlegung. Die beobachteten Fassadenpunkte beschreiben eine Bogenform, die in der gegebenen Anordnung von 3D-Zellen keine Entsprechung findet und somit nicht modelliert wird. Zur Korrektur solcher Rekonstruktionsfehler, sind Rechteckfenster, wie sie aus der Feinklassifizierung (Abschnitt 4.3.2) und der Generierung von Fensterpaar-Hypothesen (Abschnitt 4.4.1) hervorgehen, bezüglich ihrer Form zu überprüfen. Dies geschieht, indem Hypothesen über verschiedene Formen aufgestellt und getestet werden. Im Beispiel der Tür der Alten Kanzlei kommt die in Abbildung 4.9b dargestellte Zellenkonfiguration der Realität am nächsten.

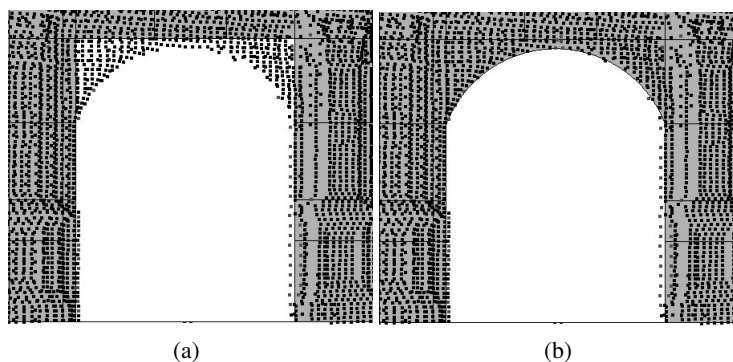


Abbildung 4.9: Überprüfung einer Rechtecksform: Zellenzerlegung und Fassadenpunkte (a), generierte Bogenform-Hypothese (b).

In dieser Arbeit werden ausschließlich Hypothesen für die Ausprägung des oberen Fensterabschlusses formuliert. Dies beruht auf der Annahme, dass die linke, rechte und untere Fensterbegrenzung durch vertikale beziehungsweise horizontale Kanten beschrieben werden können und bezüglich ihrer Position auf der Fassade korrekt sind. Betrachtet werden Bogenfenster und Schrägfenster. Die häufigsten Bogenformen sind der Rundbogen, der Segmentbogen, der Korbogen und der Spitzbogen. Abbildung 4.10 veranschaulicht die Zellenkonfigurationen, die aus den als Hypothesen formulierten Fensterausprägungen gebildet werden. In jedem dieser Fälle wird das ursprüngliche Rechteckfenster durch eine Fenster- und eine Wandzelle ersetzt. Die Geometrie der Zellenanordnungen ist durch die eingezeichneten Modellparameter vollständig definiert. Formbestimmend sind jeweils die Fensterbreite b und die

Pfeilhöhe h , die den senkrechten Abstand des höchsten Bogenpunktes von der Scheitellinie bezeichnet. Die charakteristischen Merkmale der einzelnen Fensterformen und die mathematischen Zusammenhänge, die sich daraus ergeben, sind im Folgenden aufgeführt. Wie die jeweiligen Modellparameter bestimmt werden, wird im Anschluss beschrieben.

Rundbogen: Die Bogenlinie eines Rundbogens bildet einen kompletten Halbkreis (Abbildung 4.10a). Die Pfeilhöhe h entspricht der halben Fensterbreite b . Für den Radius r gilt

$$r = h = \frac{b}{2}. \quad (4.2)$$

Segmentbogen: Der Segmentbogen, auch Stichbogen genannt, verläuft kreisförmig, beschreibt jedoch anders als der Rundbogen keinen vollen Halbkreis, sondern ein Kreissegment mit einem Zentriwinkel kleiner 180° (Abbildung 4.10b). Die Pfeilhöhe h ist somit kleiner als die halbe Fensterbreite b . Der Radius r berechnet sich über die Formel

$$r = \frac{b^2}{8h} + \frac{h}{2}. \quad (4.3)$$

Korbbogen: Ein Korbbogen setzt sich aus drei oder mehr Kreissegmenten mit unterschiedlichen Durchmessern zusammen. Die Regel sind Bogen mit drei oder fünf Mittelpunkten. Bei der in Abbildung 4.10c dargestellten Hypothese ist die Rundung aus drei Kreissegmenten konstruiert. Die zugehörigen Radien r_1, r_2 und r_3 lassen sich wie folgt ableiten:

$$s = \sqrt{h^2 + \frac{b^2}{4}}; \quad \alpha = \arctan \frac{h}{\frac{b}{2}}; \quad t = \frac{s - (\frac{b}{2} - h)}{2}; \quad r_1 = r_3 = \frac{t}{\cos \alpha}; \quad r_2 = \frac{t + \frac{b}{2} - h}{\sin \alpha}. \quad (4.4)$$

Spitzbogen: Der Spitzbogen weist in seinem höchsten Punkt, dem Scheitelpunkt, einen Knick auf. Er entsteht aus dem Schnitt zweier Kreise, die denselben Radius haben. Liegen die beiden Kreismittelpunkte auf den Endpunkten der Scheitellinie (für $r = b$), spricht man von einem „normalen“ Spitzbogen. Bei einem geringeren Abstand der Mittelpunkte (für $\frac{b}{2} < r < b$) erscheint die Form des Spitzbogens „gedrückt“ (Abbildung 4.10d); befinden sie sich auf der verlängerten Scheitellinie außerhalb des Fensters (für $r > b$), entsteht ein „überhöhter“ Spitzbogen. In Abhängigkeit der Pfeilhöhe h ergibt sich der Radius r aus

$$s = \sqrt{h^2 + \frac{b^2}{4}}; \quad \alpha = \arctan \frac{h}{\frac{b}{2}}; \quad r = \frac{\frac{s}{2}}{\cos \alpha}. \quad (4.5)$$

Schräge: Die Schräge definiert einen bezüglich der Längsachse unsymmetrischen Fensterabschluss (Abbildung 4.10e). Sie wird durch eine Gerade mit einer Steigung größer null gebildet. Für den Neigungswinkel der Geraden gilt

$$\alpha = \arctan \frac{h}{b}. \quad (4.6)$$

Die Form der oberen Fensterbegrenzung lässt sich in jeder der aufgeführten Varianten aus den Parametern h und b berechnen. Ihre y-Position, die letztendlich die tatsächliche Fensterhöhe bestimmt, ist durch ihren minimalen senkrechten Abstand von der Oberkante des ursprünglichen Rechteckfensters festgelegt. Dieser Abstand wird im Folgenden als Wandstärke k bezeichnet. Während die Breite b bereits durch das ursprüngliche Rechteckfenster vorgegeben ist, werden die Größen h und k aus den beobachteten Fassadenpunkten ermittelt. Das hierzu verwendete Verfahren beruht auf der Annahme, dass die Oberkante des originalen Fensterobjekts die tatsächliche Fensteröffnung nicht schneidet. Dies ist dann der Fall, wenn die obere Begrenzung des Rechteckfensters entweder im Bereich des Scheitelpunktes beziehungsweise im höchsten Punkt der Schräge gefunden wurde oder aber durch eine horizontale Fensterkante eines Nachbarfensters oberhalb des Scheitelpunktes entstanden ist (siehe Abbildung 4.9b). Zur Bestimmung von h und k wird eine waagrechte Linie von oben nach unten über den in die Punkteverfügbarkeitskarte projizierten Fensterbereich bewegt. Dabei wird für die überstrichenen Zeilen kontinuierlich der prozentuale

Anteil von Wandpixeln berechnet. Fällt der entsprechende Wert erstmals unter 90%, ist vermutlich der Scheitelpunkt erreicht; k ergibt sich aus der Anzahl der passierten Zeilen. Die Verschiebung der Linie wird anschließend so lange fortgesetzt, bis der Prozentsatz von Wandpixeln nicht weiter abnimmt. Die Waagrechte fällt dann mit der Scheitellinie zusammen und h kann in analoger Weise zur Wandstärke k ermittelt werden. Auf Basis der Parameter h , k und b lassen sich nun über die Formeln (4.2) bis (4.6) die entsprechenden Hypothesen aufstellen.

Die Art und Anzahl möglicher Formhypothesen ist beliebig erweiterbar. Durch eine zusätzliche Betrachtung der unteren Fensterhälfte ließen sich zum Beispiel auch weniger häufige Fensterformen wie etwa Kreise oder Ovale erzeugen.

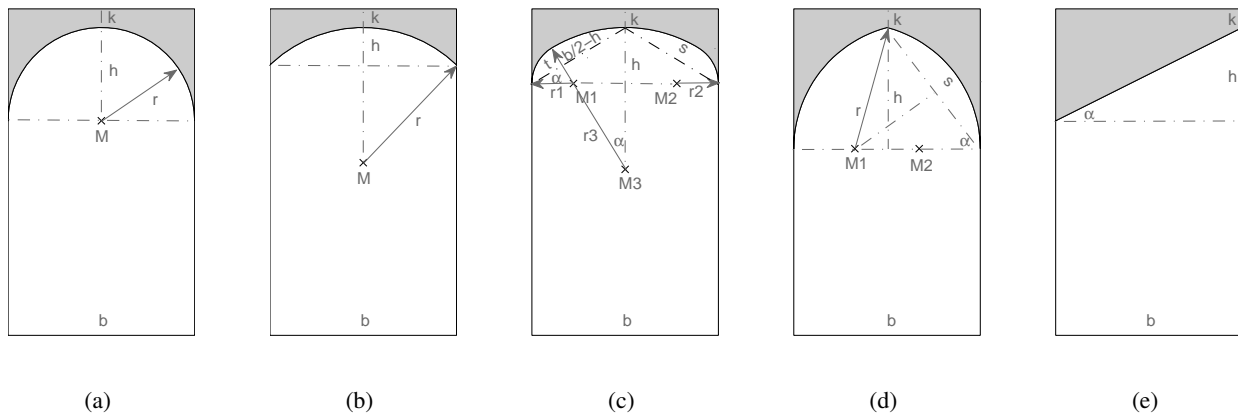


Abbildung 4.10: Hypothesen über verschiedene Fensterformen (*Fensterzellen: weiß, Wandzellen: grau*).

4.5 Modellierung

Das Ziel bisheriger Verfahrensschritte war es, aus gegebenen Sensordaten relevante Fassadenstrukturen zu extrahieren. Die Überführung der Strukturinformation in ein konsistentes 3D-Fassadenmodell ist zu diesem Zeitpunkt noch nicht erfolgt. Sie ist Aufgabe des in Abschnitt 4.5.1 dargestellten Modellierungsvorgangs.

Das vorgestellte Rekonstruktionsverfahren ist nicht auf Fassadeneinbuchtungen beschränkt. Das einfache Prinzip der Zellenzerlegung erlaubt die Modellierung von Gebäudevorsprüngen in ähnlicher Weise. Abschnitt 4.5.2 behandelt diesen Aspekt.

4.5.1 Verschmelzung der Zellen

Nach der Klassifizierung und der anschließend durchgeführten Verifikation stellt sich das Gebäude als eine Zerlegung in eine Vielzahl von Wand-, Fenster- und Gebäudezellen dar. Fassadenstrukturen sind dabei implizit in den Zellenbegrenzungen und deren Semantik enthalten. Um daraus ein explizites 3D-Oberflächenmodell abzuleiten, müssen lediglich die Fensterzellen aus der Zellenkonfiguration entfernt und die verbleibenden Gebäude- und Wandzellen verschmolzen werden.

Abbildung 4.11 veranschaulicht das Ergebnis dieses Modellierungsschritts für den Datensatz Alte Kanzlei. Die Frontseite der Dachgaube wurde während der Fassadenrekonstruktion nicht als Teil der Fassade interpretiert und daher separat von dieser modelliert.

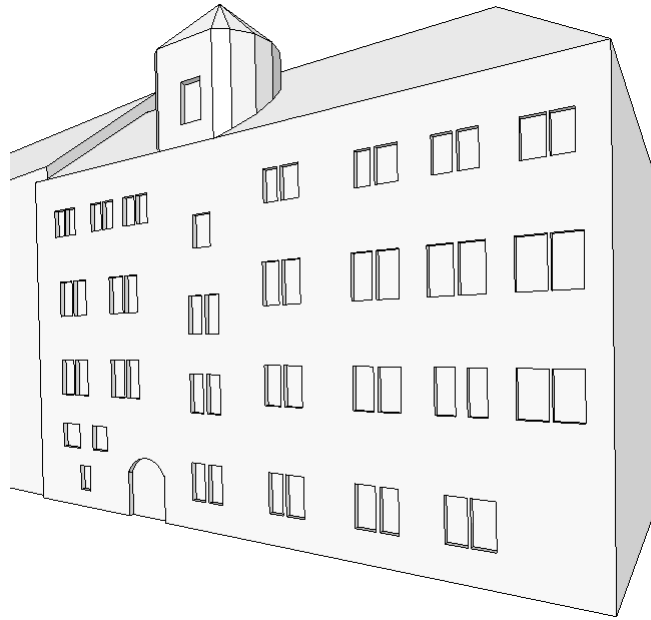


Abbildung 4.11: Ergebnis der Fassadenrekonstruktion für den Datensatz Alte Kanzlei.

4.5.2 Erweiterte Modellierung

Das Vorgehen zur Modellierung von Gebäudevorsprüngen gleicht in weiten Teilen der beschriebenen Rekonstruktion von Fenstern und Türen. Unterschiede ergeben sich bei der Interpretation der gemessenen LiDAR-Punkte und im Modellierungsschritt.

Die Klassifizierung der beobachteten 3D-Punkte in *Fassadenpunkte* und *Nicht-Fassadenpunkte* erfolgt wie bisher durch Auswertung der senkrechten Punktabstände zur Fassadenebene. Während für die Suche nach Einbuchtungen die hinter der Referenzebene liegenden Punkte als Nicht-Fassadenpunkte interpretiert wurden, bezieht sich diese Bezeichnung nun auf alle Punkte, die sich vor der Referenzebene befinden. Punkte auf oder hinter der Ebene gelten jetzt als Fassadenpunkte. Gebäudevorsprünge, im Folgenden auch Vorbauten genannt, sind in der Menge der Fassadenpunkte somit durch „Löcher“ repräsentiert. Die Voraussetzung für die Suche nach Kantenpunkten nach dem in Abschnitt 4.2.1 erläuterten Prinzip ist somit geschaffen. Die anschließende Bestimmung von horizontalen und vertikalen Kantenlinien, die Zellenzerlegung sowie die Klassifizierung der 3D-Zellen in *Vorbau-* und *Gebäudezellen* erfolgt analog zur Rekonstruktion von Fenstern, wie sie in den Abschnitten 4.2.2 und 4.3 beschrieben ist.

Die Vorbauzellen liegen zunächst wie auch die Gebäudezellen hinter der Fassadenebene. Um sie aus dem Gebäude heraustreten zu lassen, muss ihre Ausdehnung in Richtung der Fassadennormalen ermittelt werden. Dies geschieht über das in Abschnitt 4.2.2 dargestellte Plane-Sweep-Verfahren. Es entsteht eine quaderförmige Zelle, die teils innerhalb, teils außerhalb des Gebäudes liegt. Im Folgenden wird nur noch derjenige Part als Vorbauzelle bezeichnet, der außerhalb des Gebäudes liegt; der durch einen Schnitt entlang der Fassadenebene abgetrennte hintere Zellenteil wird zur Gebäudezelle. Eine so erzeugte Vorbauzelle weist eine einfache Quaderform auf, deren Übereinstimmung mit Beobachtungen der Realität überprüft und gegebenenfalls verbessert werden muss. Zur Verifikation der oberen, unteren und seitlichen Zellenbegrenzungen werden die Abstände der in diesen Bereichen erfassten 3D-Punkte zu den jeweiligen Flächen ausgewertet. Kann aus den Punkten eine Ebene geschätzt werden, die die Realität besser approximiert als die existierende Fläche, wird letztere entfernt. Die Verschneidung der verbliebenen Vorbaufächen mit allen neu gefundenen Ebenen resultiert in einer Vorbauzelle, die in ihren Randbereichen an die beobachteten 3D-Punkte besser angepasst ist. Um zudem die Frontfläche der Vorbauzelle durch eventuell vorhandene Strukturen anzureichern, kann das komplette Verfahren zur Rekonstruktion von Vertiefungen oder Vorsprüngen auf die Vorbauzelle rekursiv angewendet werden. Zuletzt werden die solchermaßen ausmodellierten Vorbauzellen an das bereits durch Fenster und Türen verfeinerte 3D-Gebäudemodell angefügt.

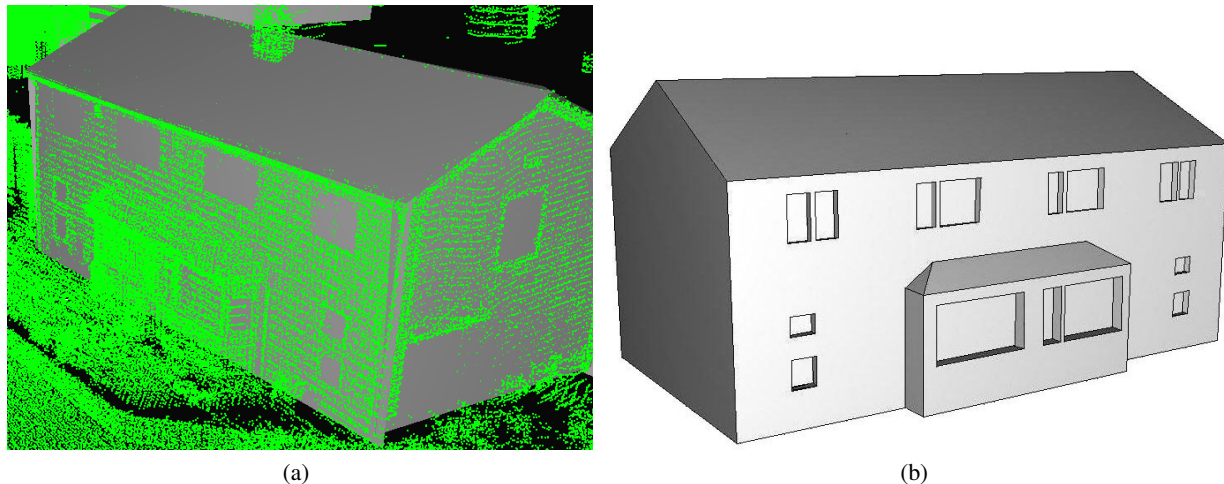


Abbildung 4.12: Datensatz „Red House Farm“: Punktwolke mit grobem Gebäudemodell (a), verfeinertes Gebäudemodell nach rekursiv durchgeführter Fassadenrekonstruktion (b).

Als Beispiel zeigt Abbildung 4.12a die Punktwolke eines Gebäudes in Altrincham (Cheshire, England), aufgenommen durch das StreetMapper-System und freundlicherweise zur Verfügung gestellt von der „School of Civil Engineering and Geosciences - Newcastle University“, und das zugehörige grobe 3D-Gebäudemodell. Das Ergebnis der rekursiv durchgeführten Fassadenrekonstruktion ist in Abbildung 4.12b zu sehen.

4.6 Optionale bildbasierte Verfeinerung

Der erreichbare Detailgrad der Fassadengeometrien, die aus terrestrisch erfassten LiDAR-Daten abgeleitet werden, ist durch den Abtastabstand am Objekt begrenzt. Kleine oder sehr schmale Strukturen sind entweder schwer zu erkennen oder gar nicht in der Punktwolke repräsentiert. Um die Fassadenmodelle um weitere geometrische Details anzureichern, besteht die Option, höher aufgelöste Bilddaten in den Rekonstruktionsprozess zu integrieren. Das im Folgenden vorgestellte Verfahren extrahiert aus einem georeferenzierten Stereobildpaar mit bekannter relativer Orientierung Strukturen, die anschließend in Form von 3D-Zellen zu der bestehenden Zellenzerlegung hinzugefügt werden. Die Vorinformation bereits bekannter Fensteröffnungen wird genutzt, um gezielt Fensterstreben zu rekonstruieren. Berücksichtigt werden dabei geradlinige horizontale und vertikale Sprossen, nicht aber weniger häufige Bogensprossen oder Sprossen unter freiem Winkel.

Zunächst werden aus den Bildern 3D-Kanten abgeleitet (Abschnitt 4.6.1). Die weitere Rekonstruktion wird durch die Generierung von Hypothesen gestützt (Abschnitt 4.6.2). Dazu werden Hypothesen über mögliche Sprossenkonfigurationen aufgestellt und auf Grundlage der 3D-Kanten verifiziert beziehungsweise verworfen. Auf diese Weise lassen sich auch dann realistische Sprossenordnungen erzeugen, wenn die aus den Bildern extrahierte Strukturinformation hierfür alleine nicht ausreicht. Ungenauigkeiten der 3D-Kanten, hervorgerufen durch Fehler in der 2D-Kantenextraktion und -zuordnung sowie durch Ungenauigkeiten in der Georeferenzierung der Bilder, können dadurch kompensiert werden. Dasselbe gilt für Fehler in Ausdehnung und Position der LiDAR-basiert erzeugten Fensteröffnungen, die ansonsten eine exakte Positionierung und Ausrichtung der 3D-Kanten relativ zur Fensteröffnung verhindern würden.

4.6.1 Ableitung von 3D-Kanten

Gesucht sind dreidimensionale lineare Segmente, die die Begrenzungen von Fenstersprossen beschreiben. Diese 3D-Kanten sind in dem zur Verfügung stehenden Bildmaterial, einem Stereobildpaar mit bekannter Orientierung,

als Intensitäts- oder auch Farbkanten repräsentiert. Sie definieren dort zweidimensionale Liniensegmente, aus denen sich nach der Bestimmung von Kantenkorrespondenzen 3D-Kanten ableiten lassen.

Für die Detektion von Farbkanten steht in der digitalen Bildverarbeitung eine Vielzahl von Verfahren bereit. Gängige Vorgehensweisen suchen nach lokalen Maxima in der ersten Ableitung oder nach Nulldurchgängen in der zweiten Ableitung (Marr und Hildreth, 1980), (Canny, 1986). Das Zusammenfügen der Kantenpixel zu geraden Linien kann durch konturorientierte Verfahren erfolgen wie zum Beispiel in Bässmann und Besslich (1997) beschrieben. Der in dieser Arbeit eingesetzte Algorithmus zur Kantenextraktion basiert auf der Gradientenberechnung über einen Sobel-Filter. Diejenigen Pixel, deren Gradientenbetrag einen bestimmten Schwellwert übersteigt, stellen Kandidaten für Kantenpunkte dar. Regionen möglicher Kantenpixel mit ähnlicher Gradientenrichtung werden über eine Non-Maxima-Unterdrückung ausgedünnt und anschließend in gerade Liniestücke segmentiert. Entscheidend sind hierbei die Abstände der einzelnen Liniensegmente von der Verbindungsgeraden der Liniensegmente. Kurze Kantenstücke werden verworfen.

Nachdem in beiden Bildern 2D-Kanten identifiziert sind, kann die Suche nach Kantenkorrespondenzen erfolgen. Hierfür sind unterschiedliche Strategien denkbar. Unter Berücksichtigung der Orientierung der Bilder können als Grundlage für die Zuordnung beispielsweise Kanteneigenschaften wie Länge oder Richtung dienen (Braess, 1997). Man spricht dann von einer merkmalsbasierten Zuordnung. Andere Verfahren nutzen Beziehungen der Kanten untereinander für eine sogenannte relationale Zuordnung (Vosselman, 1992), (Bellone et al., 1996). Auf eine Analyse von Kanteneigenschaften und -relationen kann verzichtet werden, wenn die Suche nach Korrespondenzen auf die Kantenendpunkte reduziert wird. Ein entsprechender Ansatz wird im Folgenden vorgestellt. Bei der Zuordnung von Fassadenelementen wie Fenstersprossen, die in der Objektszene mehrfach auftreten, ist die Wahrscheinlichkeit von Fehlzuordnungen generell groß. Die Bestimmung von Kantenpaaren wird hier deshalb gestützt durch die Strukturinformation, die bereits aus der LiDAR-Punktwolke gewonnen wurde und im 3D-Fassadenmodell in Form von Fenstereinbuchtungen vorliegt. Die Umrisse der Fensteröffnungen werden über die Kollinearitätsgleichungen in beide Bilder projiziert. Nur die Kanten, die innerhalb der projizierten Fensterregionen liegen, werden für die nachfolgende Kantenzuordnung berücksichtigt. Auf diese Weise lässt sich der Suchbereich erheblich einschränken; die Anzahl möglicher Fehlzuordnungen verringert sich zudem. Um eventuelle Versätze zwischen den in die Bilder projizierten Fensteröffnungen und den dort abgebildeten Fensterregionen auszugleichen, werden die Fensteröffnungen vor ihrer Projektion in x- und y-Richtung um einen Pufferbereich erweitert. Dessen Größe orientiert sich an der Unsicherheit, mit der die Fassadenstrukturen und die Orientierungsparameter der Bilder behaftet sind. Eine allgemeine Betrachtung von Fehlereinflüssen auf die Fassadenrekonstruktion ist in Abschnitt 4.8.1 gegeben.

Die Suche nach Kantenpaaren innerhalb der zu einem Fenster gehörenden Ausschnitte des linken und rechten Bildes beginnt mit der Selektion der darin enthaltenen 2D-Kanten. Je nachdem, aus welchem Bild sie stammen, werden sie im Folgenden als *linke* beziehungsweise *rechte Kanten* bezeichnet. Nacheinander wird aus der Menge der linken Kanten ein Vertreter ausgewählt, um für dessen Endpunkte die Epipolarlinien im rechten Bild zu berechnen. Verwendet wird hierbei die relative Orientierung, die im Zuge der automatischen Bildregistrierung (Abschnitt 3.2.4) ermittelt wurde. Eine rechte Kante wird dann als korrespondierende Kante akzeptiert, wenn ihre Endpunkte von den jeweiligen Epipolarlinien um nicht mehr als ein bestimmter Distanzschwellwert entfernt sind. Dieser wird abhängig von der Unsicherheit der Bildorientierungsparameter gewählt. Für die hier vorliegende Aufnahmeconfiguration hat sich ein Schwellwert als sinnvoll erwiesen, der einem maximal erlaubten Abstand von 10 cm im Objektraum entspricht. Die Wahrscheinlichkeit, dass diese Anforderung von mehreren Kanten gleichzeitig erfüllt wird, steigt, wenn die Epipolarlinien annähernd parallel zu den Objektkanten ausgerichtet sind. Bei der speziellen Aufnahmegeometrie ebener Hausfassaden ist dies häufig der Fall; Mehrfachzuordnungen sind somit trotz des eingeschränkten Suchbereichs möglich. Die Elimination falscher Zuordnungen erfolgt auf Basis der daraus abgeleiteten 3D-Kanten im Objektraum.

Die 3D-Kanten werden für alle gefundenen Kantenpaare eines Fensters über einen Vorwärtsschnitt berechnet. Die Unterscheidung zwischen falschen und korrekten 3D-Kanten beruht auf der Annahme, dass es sich bei den zu rekonstruierenden Fenstersprossen um geradlinige Objektstrukturen handelt, die sich im Bereich der Rückwand der Fenstereinbuchtung befinden, parallel zur Fassadenebene sind und außerdem horizontal oder vertikal verlaufen. Ist für eine 3D-Kante eine dieser Bedingungen nicht erfüllt, wird sie entfernt. Abbildung 4.13a,b veranschaulicht die

2D-Kanten, die für ein bestimmtes Fenster der Alten Kanzlei im linken und rechten Bild selektiert wurden. Die daraus rekonstruierten 3D-Kanten sind in Abbildung 4.13c im lokalen Fassadenkoordinatensystem gegeben. Grüne Linien signalisieren die als falsch identifizierten 3D-Kanten; korrekte Kanten sind rot dargestellt. Das schwarze Polygong repräsentiert die aus den LiDAR-Daten extrahierte Fensteröffnung.

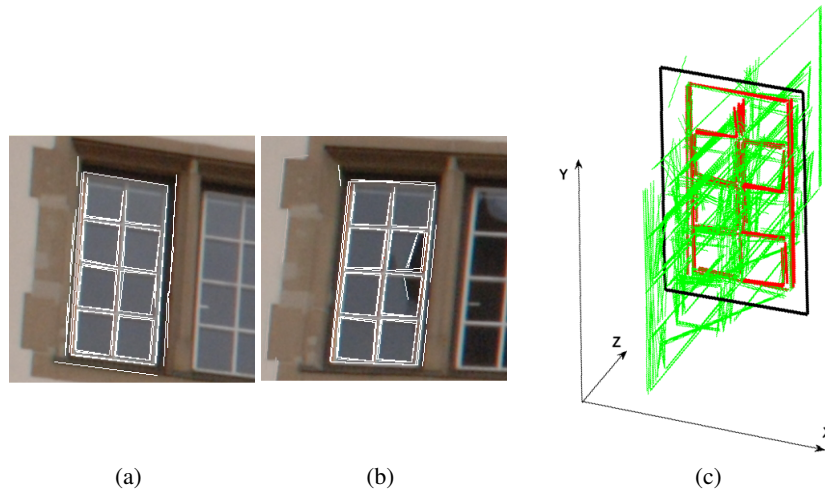


Abbildung 4.13: Datensatz „Alte Kanzlei, Stuttgart“: für ein bestimmtes Fenster selektierte 2D-Kanten im linken und rechten Foto (a) und (b) sowie die daraus abgeleiteten 3D-Kanten (c).

4.6.2 Rekonstruktion zusätzlicher Fassadenstrukturen

Für die geometrische Modellierung der Fenstersprossen werden Hypothesen über mögliche Sprossenkonfigurationen aufgestellt, die anhand der aus den Bilddaten abgeleiteten 3D-Kanten angenommen oder verworfen werden. Die Sprossenkonfigurationen oder auch Sprossenbilder werden dynamisch generiert, indem die Fensterfläche rekursiv durch abwechselnd durchgeführte horizontale und vertikale Schnitte in zwei oder drei gleich große Felder unterteilt wird. Nach jedem Rekursionsschritt entsteht ein neues Template, das mit den vorliegenden 3D-Kanten verglichen wird. Eine Unterteilung wird dann akzeptiert, wenn innerhalb eines Pufferbereichs um die Schnittlinie herum mindestens eine 3D-Kante verfügbar ist. Die Größe des Pufferbereichs entspricht hierbei der Unsicherheitsregion, die bereits bei der Projektion der Fensteröffnung in die Bilder verwendet wurde. Die Rekursion bricht ab, wenn das aktuell zu teilende Fenstersegment vollständig innerhalb des Pufferbereichs liegt. Die Ausdehnung der betrachteten Fensterfläche senkrecht zur Teilungslinie ist dann zu gering, als dass das Vorliegen einer 3D-Kante mit Signifikanz bestätigt werden könnte. Eine Auswahl von Sprossenbildern, die auf die beschriebene Weise als Templates erzeugt werden können, ist in Abbildung 4.14 zu sehen.

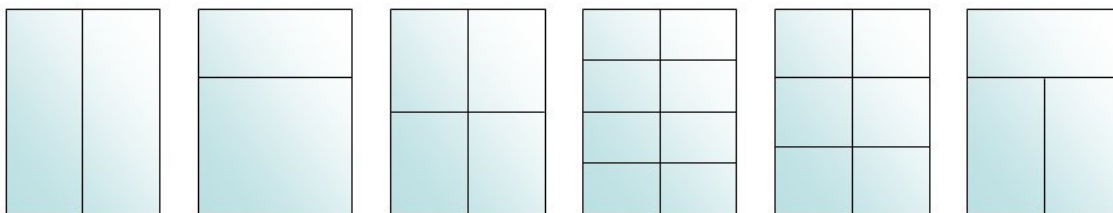


Abbildung 4.14: Beispiel-Hypothesen für mögliche Sprossenkonfigurationen.

Die eigentliche Modellierung der Fenstersprossen geschieht, indem neue 3D-Zellen generiert und an den akzeptierten Teilungslinien eingefügt werden. Die Länge der stabförmigen Zellen mit rechteckiger Querschnittsfläche entspricht der Länge der jeweiligen Teilungslinie. Die Maße der Querschnittsfläche werden zunächst mit einer

Breite und Tiefe von je 3 cm auf in der Architektur gebräuchliche Richtwerte gesetzt. Ist eine Fenstersprosse durch mehr als eine 3D-Kante repräsentiert, können die entsprechenden Größen an die realen Daten angepasst werden. Um die rekonstruierten Fenstersprossen nicht direkt auf das Mauerwerk auftreffen zu lassen, werden zusätzliche 3D-Zellen für die Fensterrahmen erzeugt. Die langgestreckten 3D-Zellen folgen dabei der Laibung. Länge und Krümmung sind dadurch bereits festgelegt. Die Maße der Querschnittsfläche erhalten die zuvor genannten Richtwerte beziehungsweise die betreffenden Maße vorhandener Fenstersprossen. Abbildung 4.15 zeigt das Ergebnis für das Fensterpaar aus Abbildung 4.13a und b.



Abbildung 4.15: Datensatz „Alte Kanzlei, Stuttgart“: rekonstruierte Fenstersprossen für ein Fensterpaar.

Der Erfolg des beschriebenen Verfahrens setzt voraus, dass jede Fenstersprosse eines Fensters, durch mindestens eine 3D-Kante und damit durch mindestens ein korrespondierendes Kantenpaar in den Bildern vertreten ist. Dies ist dann nicht gegeben, wenn Verdeckungen oder schwierige Lichtverhältnisse in wenigstens einem der Bilder eine korrekte und vollständige Detektion der Kante verhindern. Probleme können darüber hinaus in Fensterbereichen entstehen, die unter schrägem Blickwinkel aufgenommen wurden. Dort bewirkt eine starke perspektive Verzerrung eine Verkleinerung des abgebildeten Fensterbereichs. Insbesondere horizontal verlaufende Sprossen können dadurch so verkürzt dargestellt werden, dass sie nicht als gültige 2D-Kanten akzeptiert werden. Abbildung 4.16 veranschaulicht die unvollständig detektierten 2D-Kanten im Bereich eines unter schrägem Blickwinkel erfassten Fensters.



Abbildung 4.16: Datensatz „Alte Kanzlei, Stuttgart“: detektierte 2D-Kanten für ein Fenster unter schrägem Blickwinkel.

Um jedoch auch in solchen Fällen eine realistische Sprossenkonfiguration rekonstruieren zu können, werden Nachbarschaftsbeziehungen in die Modellierung miteinbezogen. Die Vorgehensweise beruht auf der Annahme, dass Fenster, die in einer Zeile oder Spalte angeordnet sind und zudem dieselbe Form und eine ähnliche Größe aufweisen, ein identisches Sprossenbild besitzen. Entsprechende Fenster können demnach als verschiedene Realisierungen eines Fenstertyps interpretiert und innerhalb der hypothesengesteuerten Rekonstruktion der Sprossen gemeinsam betrachtet werden. Stellvertretend für alle Fenster-Realisierungen werden die Templates für den betreffenden

Fenstertyp generiert. Für die Überprüfung der Hypothesen werden die verfügbaren 3D-Kanten aller beteiligten Fenster herangezogen. Fenstersprossen lassen sich somit selbst dann robust rekonstruieren, wenn im Einzelfall nicht alle Sprossen durch 3D-Kanten repräsentiert sind.

4.7 Ergebnisse

Um das Potenzial des beschriebenen Verfahrens aufzuzeigen, wurde es auf verschiedene Datensätze angewendet. Ergebnisse sind exemplarisch in Abbildung 4.18 dargestellt. Bei der Auswahl der Beispiele wurde darauf Wert gelegt, dass Laserdaten möglichst unterschiedlicher Laserscan-Systeme vertreten sind. Die vorliegenden Punktwolken stammen entweder aus den Messungen des statisch eingesetzten Leica HDS3000-Scanners oder wurden mobil mit dem StreetMapper- oder dem ROAMER-System (Kukko et al., 2007) erfasst. Spezifikationen und Genauigkeitsangaben zu den einzelnen Systemen sind in Abschnitt 3.1 gegeben. Die Datensätze zeigen Gebäude in Stuttgart und Espoonlahti (Finnland). Für einige der Datensätze waren zusätzlich zu den Punktwolken Fassadenaufnahmen vorhanden, auf deren Grundlage die in Abschnitt 4.6 beschriebene bildbasierte Verfeinerung realisiert werden konnte. Die hierzu notwendige Registrierung der Bilder zu den LiDAR-Daten wurde für die Punktwolken des HDS3000-Scanners nach dem in Abschnitt 3.2.4 erläuterten Verfahren durchgeführt. Für die Datensätze der mobil arbeitenden Scan-Systeme erfolgte dieser Schritt manuell. Die groben Gebäudemodelle konnten im Fall der Stuttgarter Beispiele dem 3D-Stadtmodell entnommen werden, das aus luftgestützt aufgenommenen Daten halbautomatisch generiert wurde (Wolf, 1999) und vom Stadtmessungsamt Stuttgart zur Verfügung gestellt wird. Für die übrigen Beispiele wurden die groben 3D-Modelle aus den vorliegenden Laserpunktwolken manuell abgeleitet. Tabelle 4.1 fasst die grundlegenden Eigenschaften der einzelnen Datensätze zusammen. Um eine visuelle Beurteilung der rekonstruierten Fassaden zu ermöglichen, enthält Abbildung 4.17 Kameraaufnahmen der jeweiligen Gebäudeseiten. Eine ausführliche Diskussion der Rekonstruktion folgt in Abschnitt 4.8.

Gebäude	LiDAR-Daten		Bilddaten	
	Aufnahmesyst.	Ø Punktabst.	Kamera	Auflösung
Alte Kanzlei, Stuttgart	HDS3000	4 cm	Nikon D2x Nikkor 20 mm	4288 × 2848 pix
Alte Kanzlei, Stuttgart	StreetMapper	6 cm	Nikon D2x Nikkor 20 mm	4288 × 2848 pix
Rektoramt, Stuttgart	HDS3000	1 cm	-	-
Linden-Museum, Stuttgart	StreetMapper	8 cm	Nikon D2x Nikkor 20 mm	4288 × 2848 pix
Wohngebäude, Espoonlahti	ROAMER	10 cm	-	-

Tabelle 4.1: Kenndaten der rekonstruierten Datensätze.

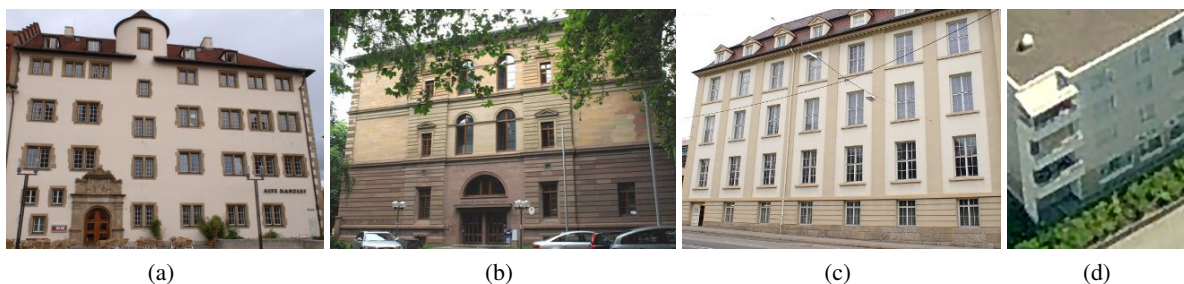


Abbildung 4.17: Rekonstruierte Fassaden der Gebäude: Alte Kanzlei (a), Rektoramt (b), Linden-Museum (c), Wohngebäude (d) (aus Bing Maps (<http://www.bing.com/maps/>)).

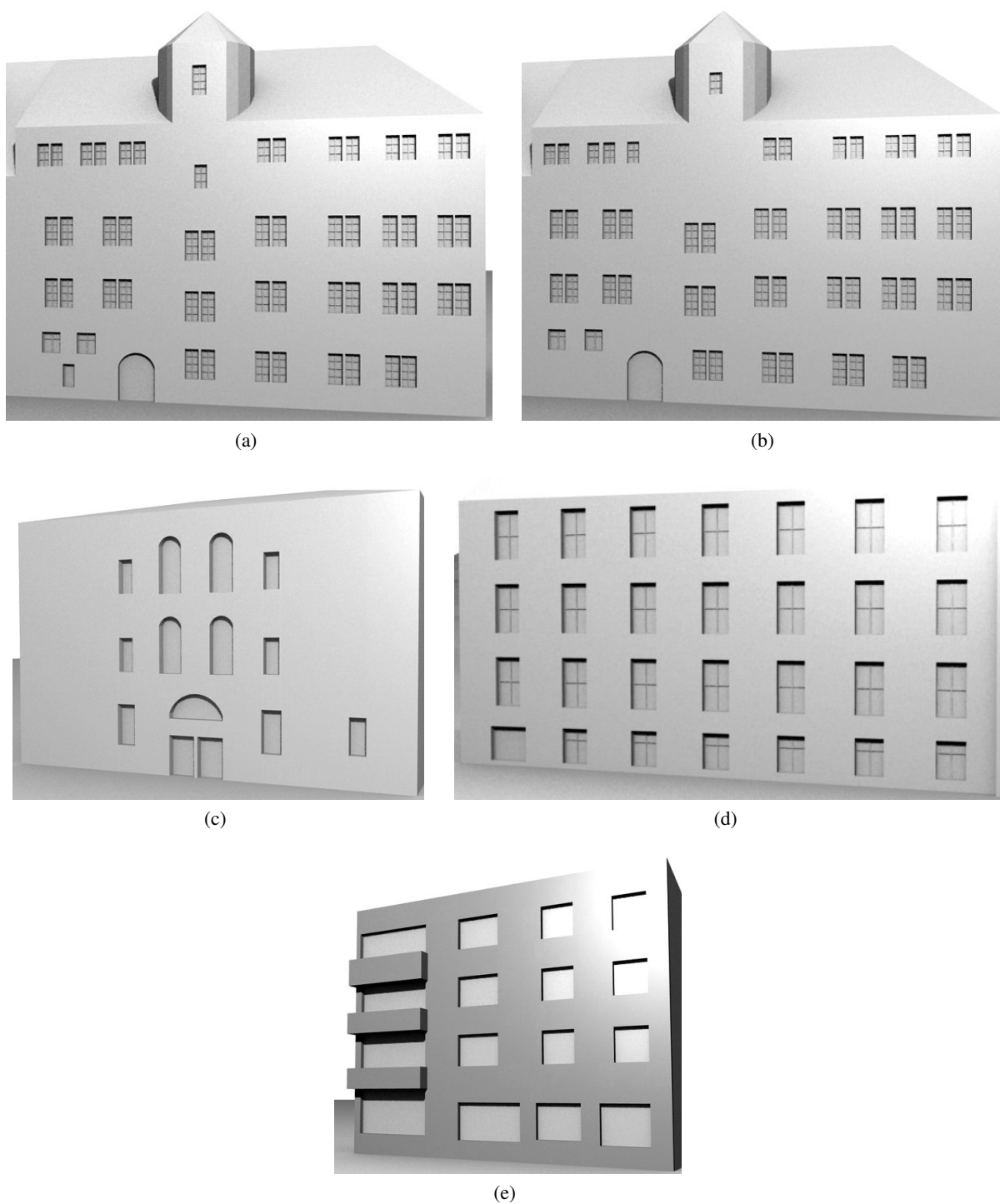


Abbildung 4.18: Ergebnisse der datengetriebenen Fassadenrekonstruktion für die Datensätze „Alte Kanzlei, HDS3000“ (a), „Alte Kanzlei, StreetMapper“ (b), „Rektoramt, HDS3000“ (c), „Linden-Museum, StreetMapper“ (d), „Wohngebäude, ROAMER“ (e).

4.8 Diskussion

Mit dem hier vorgestellten Verfahren zur datengetriebenen Fassadenrekonstruktion lassen sich bestehende LOD2-Gebäudemodelle auf der Basis terrestrischer LiDAR-Daten vollautomatisch mit Fassadenelementen anreichern. Dabei geht es nicht um die möglichst präzise und detailgetreue Modellierung der Fassadenoberfläche mit all ihren eventuell vorhandenen reliefartigen Verzierungen, Mauerstrukturen oder Dachvorsprüngen. Während dies etwa bei der Rekonstruktion von Kulturdenkmälern im Vordergrund steht, liegt der Schwerpunkt hier auf der geometrischen und semantischen Interpretation von Fassadenelementen, die zum einen das Erscheinungsbild der Fassade wesentlich beeinflussen und zum anderen für Anwendungen etwa im Bereich der architektonischen Planung, der 3D-Navigation oder energetischer Abschätzungen wichtig sind. Das Verfahren beschränkt sich demnach auf die Rekonstruktion von Fassadeneinbuchtungen, also von Fenstern und Türen, sowie von Vorbauten wie Erker oder Balkone.

Allgemeine Betrachtungen von Vor- und Nachteilen des Verfahrens werden in Abschnitt 4.8.1 angestellt. Grundsätzliche Überlegungen zur geometrischen Genauigkeit sind ebenfalls Teil dieser Passage. Abschnitt 4.8.2 diskutiert die Zuverlässigkeit des Ansatzes. Auf Beschränkungen und Probleme der Rekonstruktion wird abschließend in Abschnitt 4.8.3 eingegangen.

4.8.1 Allgemeine Betrachtungen

Vorteile des Verfahrens ergeben sich insbesondere aus dem verwendeten Prinzip der Zellenzerlegung. Werden die Teilungsebenen für die Erzeugung der Zellen in geeigneter Weise gewählt, können fassadentypische Eigenschaften wie die Parallelität oder Rechtwinkligkeit auftretender Strukturen sehr einfach eingehalten werden. Die der Zellenzerlegung inhärente Information über die Topologie erleichtert darüber hinaus die Einbeziehung von Nachbarschaftsbeziehungen zwischen den Zellen. Dazu gehören beispielsweise Bedingungen bezüglich der Geometrie und Semantik zeilen- oder spaltenweise angeordneter Zellen. Die Fassadenrekonstruktion aus einer Menge nicht überlappender 3D-Zellen ähnelt dem Baukastenprinzip. Einbuchtungen in der Fassade entstehen durch Weglassen, Gebäudevorsprünge durch das Hinzufügen von Zellen. Die geometrische Vielfalt der erzeugbaren Fassadenstrukturen ist zunächst durch die Wahl der Teilungsebenen begrenzt. Diese Einschränkung kann jedoch durch das hypothesengestützte Austauschen einer Zelle durch eine beliebige feinere Zellenaufteilung gleichen Gesamtvolumens aufgehoben werden. Auf diese Weise lassen sich auch solche Formen erzeugen, die in der ursprünglichen Zellenaufteilung nicht repräsentiert sind. Die einfache Handhabung der 3D-Zellen ermöglicht so die Generierung unterschiedlich detaillierter Gebäude- beziehungsweise Fassadenmodelle.

Unverzichtbare Datengrundlage des vorgestellten Verfahrens sind terrestrisch erfasste LiDAR-Punkte. Hinsichtlich der Rekonstruktion von Fassadenstrukturen ergeben sich daraus sowohl Vor- als auch Nachteile. Eine generelle Stärke der Datenerfassung durch Laserscanning ist, dass die beobachtete Objektszene unmittelbar nach dem Scanningvorgang als 3D-Information vorliegt. Darüber hinaus begünstigen die gegensätzlichen Rückstrahleigenschaften von Wand- und Glasflächen die Interpretation der 3D-Punkte. Die Durchlässigkeit von Glas für Laserstrahlen führt zu punktefreien Bereichen in der Fassadenebene und liefert somit die Voraussetzung für eine einfach zu realisierende Suche nach Fensterregionen. Nachteile resultieren in erster Linie daraus, dass durch Laserscanning das Objekt unabhängig von seinen geometrischen Eigenschaften in einem vorgegebenen Abtastmuster erfasst wird; Fensterkanten werden nicht gezielt aufgemessen und sind somit höchstens zufällig explizit durch 3D-Punkte repräsentiert. Der durchschnittliche Punktabstand auf der Fassade limitiert den erreichbaren Detailgrad der LiDAR-basierten Fassadenrekonstruktion. Eine Option, den Detailgrad der Fassadenmodelle weiter zu erhöhen, wurde mit der Modellierung von Fenstersprossen aus Bildern vorgestellt. Das Verfahren ist als Beispiel für mögliche Erweiterungen der Fassadenrekonstruktion zu sehen, die auf der Integration zusätzlicher Daten oder Gebäudeinformationen beruhen.

Im Unterschied zu Arbeiten, die sich mit der möglichst exakten Rekonstruktion von Kulturdenkmälern befassen - Grussenmeyer et al. (2008) erlaubt einen Eindruck vom Potential von aus Laserdaten abgeleiteten Modellen -, liegt

der Schwerpunkt hier nicht auf einem Höchstmaß an zu erzielender Detailtreue und geometrischer Genauigkeit. Vielmehr steht das zuverlässige Erkennen und Modellieren semantisch bedeutsamer Fassadenelemente (Fenster und Türen) im Vordergrund. Bezüglich einer Betrachtung der geometrischen Genauigkeit werden daher an dieser Stelle lediglich mögliche Fehlereinflüsse genannt; auf weiterführende Literatur wird verwiesen.

Die erwähnten Fehlereinflüsse resultieren sowohl aus dem vorgestellten Algorithmus als auch aus der eingesetzten Sensorik. Zu ersteren tragen die wesentlichen Schritte der Fassadenrekonstruktion - die Segmentierung der Punktwolke und die Klassifikation der 3D-Zellen - bei. Die algorithmisch bedingten Fehlereinflüsse genau zu untersuchen, erscheint hier jedoch wenig lohnenswert, da weitreichendere Fehlereinflüsse aus der Sensorik die möglichen Abweichungen überlagern. Hersteller von Laserscannern geben in der Regel eine Einzelpunktmessgenauigkeit an. Im Fall des Leica HDS3000-Scanners wird diese auf 6 mm beziffert; für die im StreetMapper-System eingebauten Riegl-Scanner Q120i, Q120 und Q140 bewegt sie sich zwischen 20 und 50 mm (Leica, 2006; Riegl, 2009e,d, 2001). Um derartige Spezifikationen zu verifizieren, wurden in den vergangenen Jahren praktische Methoden zur Bewertung der Genauigkeit von Scan-Systemen entworfen. Beispielsweise untersuchen Kersten et al. (2009) und Böhler et al. (2003) unter anderem die Entfernungsmessgenauigkeit für verschiedene terrestrische Laserscanner, darunter sowohl auf Laufzeitmessungen basierende Systeme wie der hier verwendete Leica HDS3000-Scanner als auch phasenmessende oder nach dem Triangulationsverfahren arbeitende Geräte. Ergebnisse bestätigen die von den jeweiligen Herstellern gemachten Genauigkeitsangaben. Größere Fehler ergeben sich bei phasenmessenden Scannern, wenn der Inzidenzwinkel weniger als 45° beträgt (Kersten et al., 2009). Darüber hinaus sind signifikante Abweichungen durch den Einfluss von Objektfarbe beziehungsweise Oberflächenreflektivität möglich.

Neben der Entfernungsmessgenauigkeit spielt die räumliche Auflösung des Messsystems eine entscheidende Rolle für die geometrische Genauigkeit und die Erkennbarkeit von Strukturen. Sie lässt sich unterteilen in die Auflösung in Richtung des ausgesandten Laserstrahls und quer dazu. Letztere ist insbesondere bei mobilen Erfassungssystemen in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit starken Schwankungen unterworfen. Im Anwendungsfall der Fassadenrekonstruktion macht sich dies direkt in Positionsungenauigkeiten der Fensterkanten auf der Fassadenebene bemerkbar. Bei statischem Laserscanning ist die Auflösung quer zum ausgesandten Laserstrahl primär durch die Winkelauflösung, das heißt durch den Abtastabstand Δ am Objekt, und durch die Spotgröße δ des Laserstrahls bestimmt. Lichti (2004) gibt mit dem *EIFOV* (engl.: *Effective Instantaneous Field Of View*) ein Genauigkeitsmaß an, das beide Faktoren berücksichtigt. Entsprechende Analysen zeigen den *EIFOV* am Beispiel vier verschiedener Laserscanner-Systeme in Abhängigkeit des Abtastabstands. Bei einer Überabtastung ($\Delta < \delta$) werden Vorteile, die sich aus der Anhebung der Nyquist-Frequenz ergeben, durch den Einfluss der Spotgröße deutlich gemindert: Der *EIFOV* macht ein Vielfaches des Abtastabstands aus. Je größer hingegen der Abtastabstand im Verhältnis zur Spotgröße ist, desto weniger wirkt sich diese auf die erreichbare Auflösung aus, so dass gilt: $EIFOV = \Delta$ für $\Delta \gg \delta$.

Weitere Fehlereinflüsse ergeben sich durch Effekte, die speziell bei Messungen an Objektkanten auftreten können (Böhler et al., 2003). Trifft ein Laserstrahl auf eine Kante, wird der Laserspot aufgespalten, so dass nur ein Teil davon an der Kante selbst reflektiert wird. Der Rest der Strahlung wird entweder an direkt angrenzenden oder im Hintergrund befindlichen Oberflächen zurückgeworfen oder gar nicht reflektiert, wenn sich kein weiteres Objekt im Messbereich des Scanners befindet. Im Fall von Phasenmessungen führt die Überlagerung der reflektierten Wellen zu einer gemischten Phasenverschiebung, die keiner der betreffenden Distanzen entspricht. Sind die reflektierten Wellen um eine halbe Wellenlänge verschoben, kommt es sogar zur Auslöschung des Signals. Bei der Laufzeitmessung gepulster Lasersysteme, wie sie in dieser Arbeit ausschließlich zum Einsatz kommen, ergeben sich durch das Auftrennen des Laserspots an der Kante in der Regel zwei oder mehrere zeitlich versetzte Impulse am Empfänger. Die Distanzmessung zur Kante liefert dann ein unverfälschtes Ergebnis, wenn lediglich der erste Impuls ausgewertet wird. Eine Mittelung der registrierten Impulse führt zu einer fehlerhaften Position des Kantenpunktes. Die Größe des Fehlers hängt ab von der Differenz aus der zuerst und zuletzt erfassten Distanz und vom Winkel, den der Laserstrahl mit der Fassadennormalen einschließt. Während im luftgestützten Laserscanning insbesondere zu Klassifikationszwecken bereits seit längerer Zeit Scanner eingesetzt werden, die zwischen dem ersten und letzten Impuls unterscheiden beziehungsweise sogar eine „Full Waveform“-Analyse zulassen (Doneus und Briese, 2006), werden entsprechende Systeme für den terrestrischen Fall erst seit Kurzem entwickelt. Ein Beispiel ist die neue V-Linie von Riegl (Doneus et al., 2009; Riegl, 2009c). Anders als dort wird jedoch bei den hier verwendeten Laser-

scannern jeweils nur eine Messung zurückgegeben. Ob es sich dabei um den ersten Impuls oder eine Mittelung aus allen empfangenen Impulsen handelt, ist aus den Herstellerangaben nicht ersichtlich (siehe Abschnitt 3.1).

Zu den Fehlereinflüssen, die aus dem Scanvorgang selbst stammen, kommen zusätzlich Ungenauigkeiten aus der Registrierung und Georeferenzierung der aufgenommenen Punktwolken. Eine Abschätzung der absoluten Einzelpunktmessgenauigkeit eines mobilen Laserscanning-Systems unter den Einflüssen der INS/GPS-Komponente und des Laserscanners ist in Rieger et al. (2008) zu finden. Haala et al. (2008) untersuchen das Genauigkeitspotenzial des StreetMapper-Systems, dessen Daten in dieser Arbeit eingesetzt werden. Bei guten GPS-Bedingungen wird hier ein Genauigkeitsniveau von 3 cm oder besser erreicht. Im Falle statisch durchgeführter Scans müssen die von verschiedenen Standpunkten aus aquirierten Punktwolken zueinander registriert werden. Lindenbergh et al. (2005) bestimmen einen systematischen Fehler von 2 mm für die ICP (*engl.: Iterative Closest Point*) - basierte Registrierung dreier mit dem Leica HDS3000 aufgenommener Punktwolken. Schuhmacher und Böhm (2005) geben einen Überblick über verschiedene Ansätze zur Georeferenzierung statisch aufgemessener Laserpunktwolken und die dabei erzielbaren Genauigkeiten. Diese bewegen sich je nach Methode und eingesetzter Sensorik im Bereich von wenigen Millimetern, falls ein Tachymeter und Passpunktinformation verwendet wird, bis hin zu einigen Metern bei direkter Georeferenzierung über Lowcost-Sensoren. Gordon und Lichti (2004) präsentieren den vollständigen Fehlerhaushalt für indirekt georeferenzierte Scanner. Zufällige Fehlereinflüsse für direkt georeferenzierte Punktwolken werden in Lichti und Gordon (2004) aufgeführt und in fehlertheoretischen Betrachtungen berücksichtigt.

4.8.2 Zuverlässigkeit des Verfahrens

Die Zuverlässigkeit des Verfahrens äußert sich darin, wie sicher Fassadenelemente, im Folgenden der Einfachheit halber unter der Kategorie Fenster zusammengefasst, erkannt werden können. Für die Beurteilung der Zuverlässigkeit können Genauigkeitsmaße herangezogen werden, mit denen klassischerweise Klassifikationen von Bildern bewertet werden. In diesem Zusammenhang gilt die Fehlermatrix, auch Konfusionsmatrix genannt, als allgemein akzeptierter Standard. Aus ihr lassen sich eine Reihe statistischer Werte über die Güte der Klassifizierung ableiten. Im Hinblick auf die Zuverlässigkeitsbewertung der Fassadenrekonstruktion sind insbesondere die Gesamtgenauigkeit O_A (*engl.: overall accuracy*), der Kappa-Koeffizient κ (*engl.: kappa coefficient*) sowie der Überlassungsfehler C_E (*engl.: commission error*) und der Unterlassungsfehler O_E (*engl.: omission error*) von Bedeutung. Die Gesamtgenauigkeit gibt den prozentualen Anteil korrekt klassifizierter Pixel an. Mit dem Kappa-Koeffizienten steht eine weitere Größe zur Beurteilung der allgemeinen Klassifikationsgenauigkeit zur Verfügung. Im Gegensatz zur Gesamtgenauigkeit berücksichtigt der Kappa-Koeffizient jedoch, dass auch bei einer rein willkürlichen Klassifizierung einige Pixel des Ergebnisbildes mit den Referenzdaten übereinstimmen können (Lillesand et al., 2004). Er berechnet den Anteil der Übereinstimmungen, die über den Zufall hinausgehen, und dient somit als zufallskorrigierendes Genauigkeitsmaß (Cohen, 1960; Hudson und Ramm, 1987). κ nimmt Werte im Intervall $[-1; 1]$ an. Der Wert 1 wird erreicht, wenn eine perfekte, zufallsfreie Übereinstimmung vorliegt. Ein Kappa-Koeffizient von -1 bedeutet, dass alle Übereinstimmungen zwischen Klassifikationsergebnis und Referenzdaten zufällig sind. Weder die Gesamtgenauigkeit noch der Kappa-Koeffizient geben Auskunft über die Qualität der einzelnen Klassen. Entsprechende Informationen liefern der Überlassungs- und der Unterlassungsfehler, die für jede Klasse berechnet werden können. Der Überlassungsfehler gibt für eine erzeugte Ergebnisklasse den Prozentsatz von Pixeln an, die eigentlich einer anderen Klasse angehören. Der Unterlassungsfehler beschreibt für eine bestimmte Klasse der Referenzdaten den Anteil nicht erkannter und somit fehlender Pixel.

Um die Zuverlässigkeit der Fassadenrekonstruktion zu bewerten, wurden die beschriebenen Qualitätsmaße für repräsentative Datensätze berechnet. Hierzu wurde jeweils eine Senkrechtaufnahme der in Wand- und Fensterzellen unterteilten Fassade (siehe Abschnitt 4.3.2, Abbildung 4.6b) generiert und mit einem Fassadenfoto verglichen, das um projektive Verzerrungen bereinigt und manuell in Fenster- und Wandbereiche klassifiziert wurde. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.2 aufgeführt. Mit Werten zwischen 91.5% und 96.6% für die Gesamtgenauigkeit und Kappa-Koeffizienten im Bereich von 0.74 bis 0.83 liegen die Bewertungen der Datensätze bezüglich der allgemeinen Genauigkeit dicht beieinander. Die Summe der Überlassungs- und Unterlassungsfehler von Fenster und Wand korreliert mit dem Kappa-Koeffizienten und ist somit für Datensätze mit gleichem κ identisch. Die Aufteilung die-

ser Fehlersumme auf C_E^{Fenster} , O_E^{Fenster} , C_E^{Wand} , O_E^{Wand} variiert von Datensatz zu Datensatz. Verantwortlich hierfür sind zufällige Rekonstruktionsfehler, die überwiegend in Randbereichen von Fenstern auftreten und in erster Linie auf die diskrete Abtastung durch Laserscanning zurückzuführen sind.

Datensatz	Ø Punktabst.	O_A	κ	C_E^{Fenster}	O_E^{Fenster}	C_E^{Wand}	O_E^{Wand}
Rektoramt (HDS3000)	1 cm	96.6 %	0.83	15.6 %	14.6 %	1.9 %	2.0 %
Alte Kanzlei (HDS3000)	4 cm	95.1 %	0.82	8.9 %	20.4 %	4.2 %	1.7 %
Alte Kanzlei (StreetMapper)	6 cm	95.1 %	0.82	8.2 %	21.1 %	4.4 %	1.5 %
Linden-Museum (StreetMapper)	8 cm	91.5 %	0.74	16.9 %	23.1 %	6.4 %	4.4 %

Tabelle 4.2: Zuverlässigkeit der datengetriebenen Fassadenrekonstruktion - ausgedrückt durch in der Bildklassifikation gebräuchliche Genauigkeitsmaße.

Trotz ähnlicher Werte für Gesamtgenauigkeit und Kappa-Koeffizient lassen die Ergebnisse eine Abhängigkeit der Zuverlässigkeit von der Punktdichte vermuten. Um die Grenzen des Verfahrens auszutesten, wurde die Rekonstruktion der Alten Kanzlei (HDS3000) auf der Basis von schrittweise über die ganze Fassade hinweg ausgedünnten Punktwolken wiederholt durchgeführt und bezüglich ihrer Zuverlässigkeit bewertet. Die entsprechenden Ergebnisse sind in Tabelle 4.3 zu sehen; Abbildung 4.19 enthält die zugehörigen Fassadenrekonstruktionen, wie sie sich nach dem Schritt der Feinklassifikation darstellen. Für die Datensätze mit einem durchschnittlichen Punktabstand von $d = 8.8$ cm bis $d = 22.0$ cm liefert das Rekonstruktionsverfahren konstant gute Resultate. Der von Datensatz zu Datensatz zunehmende Punktabstand kann durch eine geeignete Wahl des in Abschnitt 4.2.1 definierten Suchradius kompensiert werden, so dass lediglich kleinere Rekonstruktionsfehler sichtbar werden (Abbildung 4.19a-d). Idealerweise beträgt der Suchradius mindestens das Doppelte des Punktabstands und ist maximal halb so groß wie die kleinste zu rekonstruierende Fassadenstruktur (siehe Formel (4.1)). Bei einer durchschnittlichen Fensterbreite von circa 90 cm bei der Alten Kanzlei kann diese Bedingung für die Datensätze mit $d = 31.5$ cm und $d = 43.6$ cm nicht mehr erfüllt werden. Der daraus resultierende Qualitätsabfall zeigt sich in den rekonstruierten Fassaden (Abbildung 4.19e,f). Die Rekonstruktion von Fenstern funktioniert hier nicht mehr zuverlässig, sondern erscheint mit wachsendem Punktabstand zufällig. Während die Gesamtgenauigkeit O_A insbesondere für den Datensatz mit $d = 43.6$ cm zu optimistisch ausfällt, spiegelt der Kappa-Koeffizient die Zuverlässigkeit der Rekonstruktion adäquat wider. Auf Basis der durchgeführten Untersuchungen kann ein Kappa-Koeffizient von mindestens 0.7 als grober Richtwert für eine zuverlässige Fassadenrekonstruktion angenommen werden.

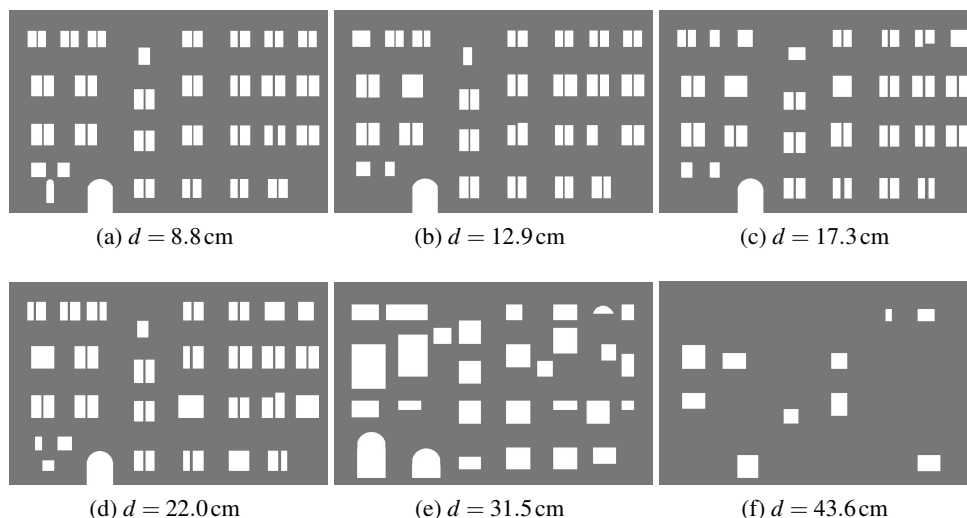


Abbildung 4.19: Datensatz „Alte Kanzlei (HDS3000)“: Rekonstruktionsergebnisse bei schrittweise vergrößertem Punktabstand d .

Datensatz	Ø Punktabstand	O_A	κ	C_E^{Fenster}	O_E^{Fenster}	C_E^{Wand}	O_E^{Wand}
Alte Kanzlei (HDS3000)	4 cm (orig.)	95.1 %	0.82	8.9 %	20.4 %	4.2 %	1.7 %
Alte Kanzlei (HDS3000)	8.8 cm	95.1 %	0.83	11.0 %	17.7 %	3.7 %	2.2 %
Alte Kanzlei (HDS3000)	12.9 cm	95.1 %	0.83	11.9 %	16.9 %	3.6 %	2.4 %
Alte Kanzlei (HDS3000)	17.3 cm	93.9 %	0.78	14.4 %	21.8 %	4.5 %	2.8 %
Alte Kanzlei (HDS3000)	22.0 cm	94.8 %	0.82	16.1 %	12.9 %	2.8 %	3.5 %
Alte Kanzlei (HDS3000)	31.5 cm	84.5 %	0.51	45.6 %	31.0 %	7.0 %	12.3 %
Alte Kanzlei (HDS3000)	43.6 cm	85.5 %	0.30	19.9 %	77.1 %	14.2 %	1.2 %

Tabelle 4.3: Zuverlässigkeit der datengetriebenen Fassadenrekonstruktion für unterschiedliche Punktabstände der zugrunde liegenden Punktwolken.

Notwendige Voraussetzung für eine zuverlässige Fassadenrekonstruktion ist, dass der Punktabstand auf der Fassade höchstens ein Viertel des Ausmaßes der kleinsten zu rekonstruierenden Fassadenstruktur ausmacht. Solange dies gilt, ist zudem die Zuverlässigkeit des Verfahrens bei entsprechender Wahl des Suchradius (siehe Formel (4.1)) vom Punktabstand nahezu unabhängig. Werden terrestrisch aquirierte Laserpunktwolken verwendet, kann unter der Annahme einer verdeckungsfreien Objektaufnahme die beschriebene Zuverlässigkeitsvoraussetzung in der Regel eingehalten werden. Je nach Aufnahmedistanz und eingestellter Winkelauflösung liegen die erreichbaren Punktabstände statisch durchgeführter Scans im Bereich einiger Millimeter; bei Punktwolken aus mobilem Laserscanning betragen sie einige Zentimeter (Rieger et al., 2008). Mit den derzeit verfügbaren Laserscanning-Systemen, ob statisch (Kersten et al., 2009) oder mobil (Riegl, 2009a), lassen sich somit bereits jetzt genügend hohe Punktdichten erzielen, um nach dem vorgestellten Verfahren Fenster zuverlässig ableiten zu können. Die rekonstruierten Fassadenmodelle der Abbildung 4.18 sind Beispiele hierfür. Die im Bereich der Laserscanning-Systeme schnell voranschreitende Entwicklung verspricht zudem durch eine verbesserte Auswertung des empfangenen Lasersignals und den Einsatz immer präziserer Positionierungskomponenten nicht nur für statisch arbeitende Geräte, sondern auch für mobiles Laserscanning eine zusätzliche Steigerung der Datenqualität hinsichtlich der erreichbaren Genauigkeit und Punktdichte (Riegl, 2009c,b).

4.8.3 Grenzen des Verfahrens

Wie in Abschnitt 4.8.2 bereits angedeutet, arbeitet das vorgestellte Verfahren dann nicht mehr zuverlässig, wenn die Wandbereiche durch eine nur unzureichend hohe Punktdichte repräsentiert sind. Darüber hinaus ergeben sich weitere Beschränkungen der datengetriebenen Fassadenrekonstruktion, falls die dem Verfahren zugrunde gelegten Annahmen nicht gegeben sind. Dazu zählen sowohl die in Abschnitt 4.2.1 gestellten Bedingungen an die Punkteverteilung auf der Fassadenfläche als auch Annahmen, die die Oberflächenbeschaffenheit der Fassade betreffen. Probleme, die sich daraus ergeben, werden im Folgenden aufgeführt; typische Rekonstruktionsfehler sind am Ende des Abschnitts in Abbildung 4.20 zusammengefasst.

Annahmen bezüglich der Punkteverteilung gehen davon aus, dass Wandregionen durch gleichmäßig verteilte Fassadenpunkte repräsentiert sind (Annahme 1), während Fensterbereiche keine in der Fassadenebene liegenden Punkte enthalten und somit in der Menge der Fassadenpunkte Löcher darstellen (Annahme 2). Annahme 1 kann aufgrund verschiedener Faktoren nicht erfüllt sein. So führen beispielsweise schräge Blickwinkel zu einer kontinuierlich abfallenden Punktdichte, die, wie in Abschnitt 4.8.2 gezeigt, die Zuverlässigkeit der Fensterextraktion wesentlich beeinträchtigt. Des Weiteren resultieren Sichthindernisse bei der Objektaufnahme in punktefreien Regionen auf der Fassadenebene, die entsprechend bei der Rekonstruktion in Fensterobjekte umgesetzt werden.

Annahme 2 ist dann nicht gegeben, wenn in Fensterbereichen 3D-Punkte auftreten, die zudem in der Fassadenebene liegen und folglich als Fassadenpunkte interpretiert werden. Derartige Punktmessungen entstehen zum Beispiel an teilweise oder vollständig geschlossenen Außenjalousien oder an schmiedeeisernen Gittern, die in der Fensteröffnung beziehungsweise unmittelbar davor angebracht sind. Sie verhindern, dass das Fenster in seiner wahren Größe

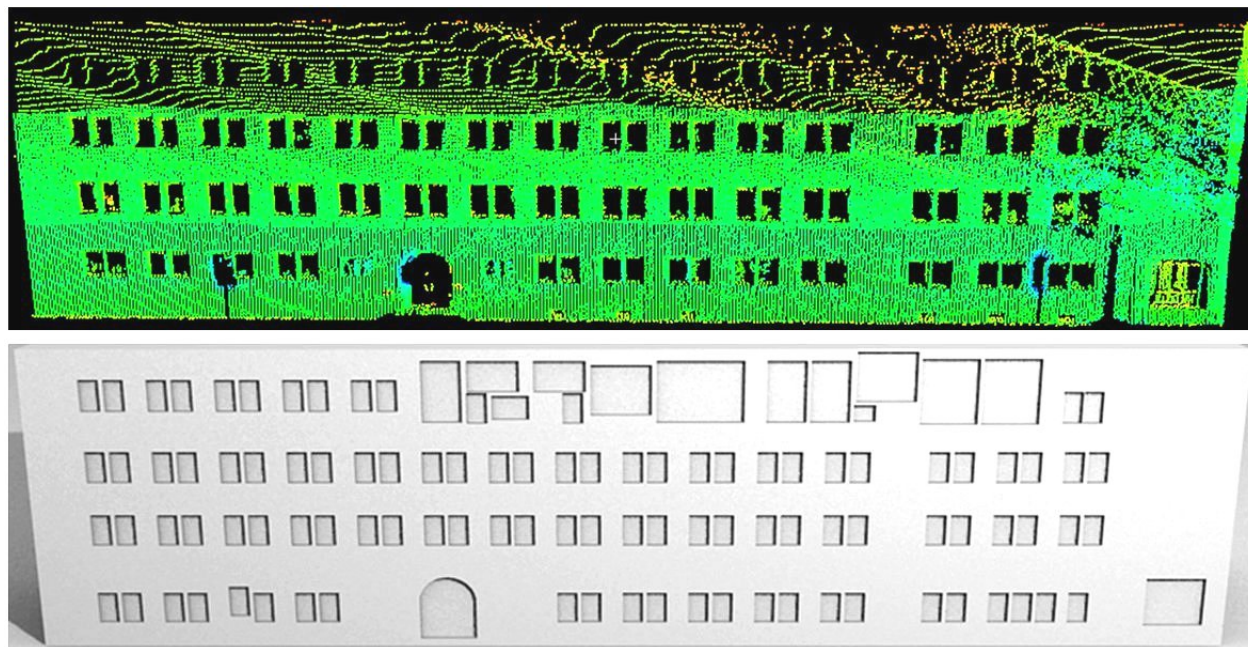
als zusammenhängender datenfreier Bereich erfasst wird. Die Fensteröffnung wird entweder gar nicht oder zu klein rekonstruiert.

Annahmen über die Oberflächenbeschaffenheit der Fassade beziehen sich sowohl auf das Material als auch auf die Rauheit der Wandflächen. Hinsichtlich des Materials geht das vorgestellte Verfahren von Baustoffen aus, die die Laserstrahlung diffus reflektieren. Dies ist für die überwiegende Mehrheit der verwendeten Baumaterialien gegeben. Probleme ergeben sich lediglich bei spiegelnden oder nicht reflektierenden Wandflächen sowie bei laserdurchlässigen Oberflächen, wie es etwa bei Glasfassaden der Fall ist. Daraus resultierende Rekonstruktionsfehler ähneln denjenigen, die auf Sichthindernisse bei der Objektaufnahme zurückzuführen sind.

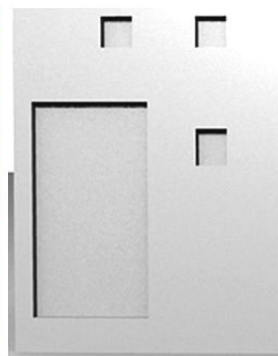
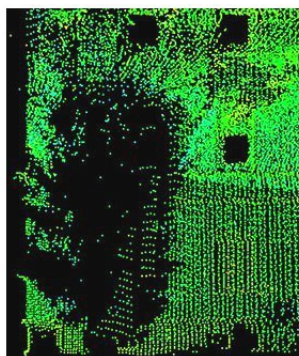
Die Rauheit der Fassade spielt bei der zu Beginn des Verfahrens durchgeführten Feinklassifizierung (Abschnitt 4.1.2) eine entscheidende Rolle. Die Unterscheidung zwischen Fassadenpunkten und Nicht-Fassadenpunkten verläuft nur dann erfolgreich, wenn die senkrechten Abstände zur Fassadenebene der im Bereich der Fassadeneinbuchtungen gemessenen 3D-Punkte signifikant größer sind als die Fassadenabstände derjenigen Punkte, die in Wandregionen erfasst wurden. Dies setzt implizit voraus, dass die 3D-Punkte der Wandbereiche eine hinreichend glatte, ebene Oberfläche beschreiben. Demnach ist beispielsweise bei stark „bewegtem“ Mauerwerk die Detektion von Nicht-Fassadenpunkten in Einbuchtungen erschwert. Dasselbe Problem tritt auf, wenn die in Wandregionen beobachteten 3D-Punkte zwar eine Ebene beschreiben, die Tiefe der Einbuchtung aber zu gering ist, als dass sie sich signifikant bestimmen ließe. Zu größeren Rekonstruktionsfehlern führt dies insbesondere dann, wenn es sich um komplett laserundurchlässige Fassadeneinbuchtungen wie etwa nicht verglaste Türen handelt. Werden die dort gemessenen Laserpunkte fälschlicherweise als Fassadenpunkte aufgefasst, bleibt die betreffende Fassadeneinbuchtung unerkannt. Die Feinklassifizierung stellt vermutlich auch dann den limitierenden Faktor dar, wenn es um die Anwendbarkeit des Verfahrens auf Punktwolken geht, die nicht durch Laserscanning, sondern durch Bildzuordnung entstanden sind. Je nach Datenqualität wird eine Anpassung des Segmentierungsprozesses erforderlich werden.

Abbildung 4.20 weist auf charakteristische Rekonstruktionsfehler hin, wie sie als Folge nicht gegebener Annahmen entstehen können. Falsch rekonstruierte Fenster in Bereichen reduzierter Punktdichten, hervorgerufen durch schräge Aufnahmewinkel beziehungsweise Sichthindernisse, sind in Abbildung 4.20a beziehungsweise Abbildung 4.20b zu sehen. Abbildung 4.20c enthält ein Beispiel für den Fall eines nicht erkannten Fensters. Verantwortlich ist hier ein unmittelbar vor dem Fenster angebrachtes engmaschiges Eisengitter, das durch eine Vielzahl gemessener Laserpunkte nicht auf eine Fassadenöffnung schließen lässt. Der in Abbildung 4.20d dargestellte Rekonstruktionsfehler ist die Folge einer nicht signifikant bestimmbarer Einbuchtung. Die gezeigte Holztür befindet sich quasi in der Fassadenebene selbst, so dass die an der Tür erfassten 3D-Punkte als Fassadenpunkte interpretiert und in eine Wandregion überführt werden. Die Verglasung im oberen Türbereich hingegen kann korrekt als Fassadenöffnung rekonstruiert werden.

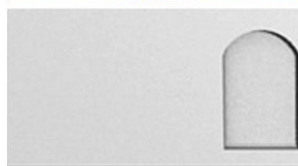
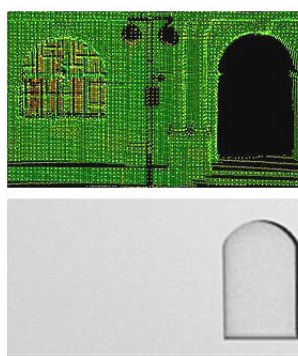
Die Fehleranfälligkeit der Rekonstruktion gegenüber unvollständigen oder fehlerhaften Sensordaten ist ein generelles Problem datengetriebener Ansätze. Sie ist gleichzeitig aber auch Motivation für die Integration zusätzlichen Wissens, das die Rekonstruktion robuster machen soll. In den folgenden Kapiteln wird ein grammatikbasiertes Verfahren vorgestellt, das aus datengetriebenen Fassadenmodellen das notwendige Strukturwissen ableitet, um es anschließend für eine von Sensordaten weitestgehend unabhängige Fassadenmodellierung einzusetzen.



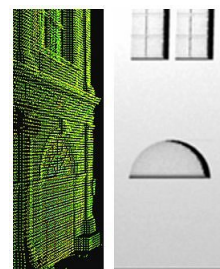
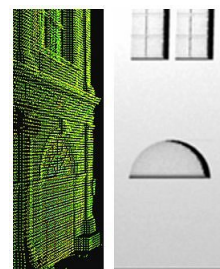
(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung 4.20: Typische Rekonstruktionsfehler des datengetriebenen Verfahrens in den Beispielen: Bürogebäude, Punktwolke aus StreetMapper (a), Ausschnitt eines Wohngebäudes, Punktwolke aus StreetMapper (b), Ausschnitt des Prinzenbaus, Punktwolke aus HDS3000 (c), Ausschnitt des Prinzenbaus, Punktwolke aus HDS3000 (d).

5 Ableitung von Modellwissen

Das Ergebnis der datengetriebenen Fassadenrekonstruktion (Kapitel 4) kann als Basis für weitere Modellierungsaufgaben verwendet werden (Becker, 2009). Die rekonstruierten Fassaden enthalten implizit Modellwissen, das sich im Wesentlichen aus geometrischen, semantischen und topologischen Eigenschaften der Fassadenstrukturen ableitet. Einbuchtungen und Vertiefungen sind als in sich abgeschlossene Geometrieobjekte modelliert; ihre Bedeutung (Fenster, Tür etc.) ist bekannt. Als elementare Fassadeneinheiten sind sie Teil des Fassadenrepertoires, aus dem sich individuelle Fassaden-Designs aufbauen lassen. Die räumliche Anordnung der Fassadenelemente ist in der Regel nicht zufällig, sondern folgt architektonischen Gestaltungs- und Ordnungsprinzipien, die die einzelnen Bausteine zueinander in Beziehung setzen (siehe Abschnitt 2.1). Das Zusammenwirken der Fassadenbausteine charakterisiert gemeinsam mit den strukturellen Zusammenhängen den Stil eines Gebäudes. Nach Mitchell (1990) ist der Bezug zu einer bestimmten Stilrichtung im architektonischen Schaffensprozess unerlässlich, soll dieser nicht nach rein zufälligen Gesichtspunkten erfolgen. Dasselbe gilt für das prozedurale Modellieren von Gebäuden und Fassaden. Charakteristische Stilmerkmale sind hier in den Terminalen und Regeln der zugrunde liegenden Grammatik enthalten. Jeder Architekturstil benötigt eine eigene Grammatik. Die manuelle Festlegung einer solchen Grammatik ist ein aufwendiger Prozess, der zudem Erfahrung voraussetzt. Ein wesentliches Ziel dieser Arbeit ist daher die automatische Ableitung individueller Fassadengrammatiken auf Basis der datengetriebenen rekonstruierten Fassadenmodelle. Dabei kommt es darauf an, die Fassadeneigenschaften zu erfassen, die für den Stil des Gebäudes charakteristisch sind. Wie in Abschnitt 2.1 dargelegt, lässt sich ein Gebäude als Ergebnis einer nach bestimmten Prinzipien ablaufenden Zerlegung des Raums begreifen. Sinnzusammenhänge lassen sich dann besser erkennen, wenn versucht wird, diesen Strukturierungsprozess nachzuempfinden. Eine formale Analyse von Fassaden erfordert demzufolge eine Strategie für die Segmentierung in elementare Einheiten sowie ein genügend ausdrucksstarkes und differenziertes formales System, so dass die jeweiligen Komponenten bezeichnet und deren Eigenschaften und Beziehungen beschrieben werden können.

Mit der in Abschnitt 2.8 eingeführten allgemeinen Definition einer Fassadengrammatik wurde die Grundlage gelegt, um unterschiedliche Fassaden formal ausdrücken zu können. Individuelle Instanzen von Fassadengrammatiken, die den Stil des beobachteten Gebäudes repräsentieren, werden automatisch aus bereits rekonstruierten Fassadenstrukturen abgeleitet. Das hierfür entwickelte Verfahren umfasst drei Schritte: Im ersten Schritt wird über die Extraktion elementarer Fassadeneinheiten zunächst die Menge der Terminalen bestimmt (Abschnitt 5.1). Der zweite Schritt beinhaltet die Suche nach übergeordneten hierarchischen Strukturen zwischen den Terminalen (Abschnitt 5.2). Im dritten Schritt werden schließlich die gefundenen strukturellen Zusammenhänge und Beziehungen in Produktionsregeln abgebildet (Abschnitt 5.3).

5.1 Bestimmung der Terminalen

Terminale sind die Grundelemente der Fassadengrammatik. Sie repräsentieren Fassadenbereiche, die semantisch als nicht weiter zerlegbare Einheiten betrachtet werden können. Nach dem Baukastenprinzip lassen sie sich zu unterschiedlichen Designs zusammensetzen. Um für die Grammatik eine sinnvolle Menge von Terminalen zu erhalten, wird in einem ersten Schritt die rekonstruierte Gebäudefassade in semantisch homogene Regionen unterteilt. Das Ergebnis ist eine Vielzahl sogenannter *Kacheln*, die entweder als *Wand-* oder *Geometriekacheln* auftreten (siehe Abschnitt 2.8). Diese Kachelinstanzen werden anschließend gemäß beobachteter Ähnlichkeiten oder Differenzen in Klassen eingeteilt. Jede Klasse steht für einen eigenen Kachel-Typ, welcher, mit einem Symbol versehen, ein Terminal der Grammatik definiert. Im Folgenden werden die Teilungsoperationen, die zur Unterscheidung einzelner Kachelinstanzen führen, sowie die Klassifizierung der Kacheln näher erläutert.

5.1.1 Segmentierung der Fassade in Kacheln

Durch horizontale und vertikale Unterteilungen wird die rekonstruierte Gebäudefassade in Kacheln segmentiert. Über die Reihenfolge, in der die Schnittpoperationen durchgeführt werden, kann der strukturelle Aufbau der Fassade nachempfunden werden. Prinzipiell können Fassadenstrukturen sowohl spalten- als auch zeilenweise geprägt sein. Einer spaltenorientierten Interpretation wird Vorrang gegeben, wenn die Fassade als erstes entlang vertikaler Symmetrieachsen oder Objektkanten segmentiert wird (Hohmann et al., 2009). Die Geometrieobjekte einer Spalte werden als übergeordnete Einheit betrachtet und erst in einem zweiten Schritt durch horizontale Schnitte voneinander getrennt. Diese Vorgehensweise eignet sich jedoch nur dann, wenn die Fassade vertikale Symmetrien aufweist oder zumindest eine spaltenweise Anordnung von Fensterobjekten vorherrschend ist. Eine andere Möglichkeit der Segmentierung besteht darin, die Fassade zunächst horizontal in Stockwerke zu zerlegen und anschließend innerhalb der Stockwerke weitere vertikale Unterteilungen vorzunehmen. Diese zeilenbasierte Sichtweise ist dadurch motiviert, dass zusammengehörige Fenstereinheiten meist innerhalb von Räumen beziehungsweise Stockwerken auftreten (Abschnitt 2.1). Das hier vorgestellte Verfahren zielt darauf ab, stockwerksorientierte Fassadenstrukturen zu extrahieren. Es führt die Schnittpoperationen in der Reihenfolge „horizontal - vertikal“ durch und folgt damit der zeilenbasierten Interpretation der Fassade. Spaltenweise Anordnungen können zusätzlich gefunden werden, indem bei der Strukturerkennung (siehe Abschnitt 5.2) die einzelnen Stockwerke nicht getrennt voneinander, sondern gemeinsam betrachtet werden.

Zu Beginn des Segmentierungsverfahrens wird die Fassade mit Hilfe horizontaler Schnittebenen in Stockwerke unterteilt. Die Bestimmung der Schnittebenen erfolgt über einen heuristischen Ansatz, der auf einem Plane-Sweep-Verfahren basiert: Eine horizontale Sweep-Plane, die bezüglich des in Abschnitt 4.1.1 festgelegten lokalen Fassadenkoordinatensystems die Gleichung $P : y = -d$ besitzt, wird in vertikaler Richtung von unten nach oben über das Gebäude geschoben. Dabei wird für jedes d mit $y_{\min}^{\text{Fassade}} \leq d \leq y_{\max}^{\text{Fassade}}$ die Schnittmenge S_d der Ebene P mit den Geometrieobjekten O_i ($i = 1, \dots, n$) berechnet. Wie in Abschnitt 2.8 definiert, beschreibt ein Geometrieobjekt eine dreidimensionale Einheit, die die ebene Fassadenfläche entweder als Einbuchtung oder als Gebäudevorsprung unterbricht. Bereiche, in denen die Sweep-Plane keine Geometrieobjekte schneidet, für die also $S_d = \emptyset$ gilt, werden als potentielle Regionen für eine Stockwerksebene gekennzeichnet. Die erste Stockwerksebene ist durch die Grundfläche des Gebäudes definiert. Weitere Stockwerksflächen werden jeweils in der Mitte der markierten Regionen eingezogen, falls der Vertikalabstand zur darunterliegenden Ebene eine minimale Stockwerkshöhe nicht unterschreitet. Abbildung 5.1 zeigt die rekonstruierte Fassade des Datensatzes „Alte Kanzlei“ mit den in Gelb dargestellten potentiellen Einfügerebenen und den daraus resultierenden Stockwerksebenen. Die auftretenden Stockwerkshöhen h_i ($i = 1, \dots, s$) sind charakteristisch für den Architekturstil des beobachteten Gebäudes und fließen als Teil der Produktionen in die Fassadengrammatik ein (Abschnitt 5.3.1, Gleichung e_1).

Das beschriebene Plane-Sweep-Verfahren liefert realistische Ergebnisse, solange die Fassade keine stockwerksübergreifenden vertikalen Überlappungen von Geometrieobjekten aufweist. Solche Konfigurationen sind beispiels-

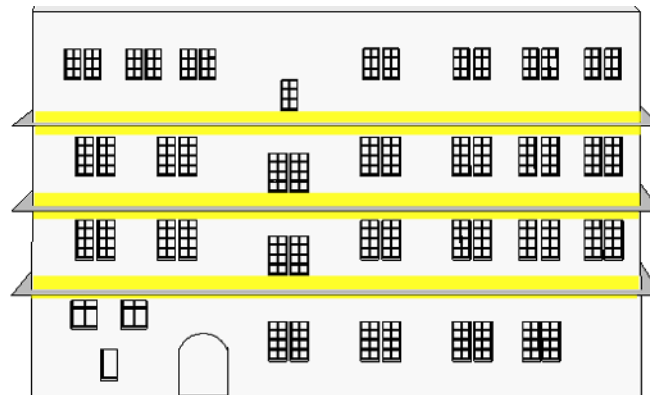


Abbildung 5.1: Bestimmung der Stockwerksebenen für den Datensatz „Alte Kanzlei, Stuttgart“.

weise im Bereich von Treppenhäusern möglich, wenn dort die Fenster gegenüber den Stockwerken vertikal versetzt sind. Ist dies der Fall, können unter Umständen keine schnittfreien Fassadenbereiche gefunden und damit keine Stockwerksflächen eingefügt werden. Die Suche nach horizontalen Schnittebenen muss dann auf einzelne Fassadenstreifen begrenzt werden, die jeweils frei von vertikalen Überlappungen sind. Die dabei notwendigen Teilungsoperationen werden anhand eines synthetischen Beispiels in Abbildung 5.2 veranschaulicht. Mit Hilfe einer lotrecht ausgerichteten und auf der Fassadenebene senkrecht stehenden Sweep-Plane wird die Fassade zunächst in vertikale Regionen segmentiert. Die Detektion potentieller Bereiche für Schnittebenen (gelbe Markierungen in Abbildung 5.2a) funktioniert dabei in analoger Weise zum horizontal ablaufenden Plane-Sweep-Verfahren. Dieses wird schließlich auf die resultierenden Fassadenstreifen getrennt angewandt (Abbildung 5.2b). Benachbarte Streifen, deren potentielle Einfügebereiche für Stockwerksebenen (gelbe Markierungen in Abbildung 5.2b) sich teilweise decken, werden wieder zusammengefasst und somit gemeinsam in Stockwerke segmentiert (Abbildung 5.2c). Die weiteren Schritte der Wissensableitung werden in den verbleibenden Fassadenstreifen getrennt vorgenommen.

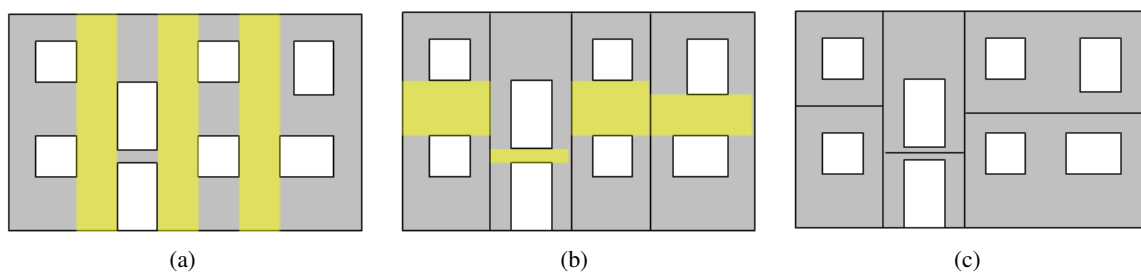


Abbildung 5.2: Bestimmung der Stockwerksebenen bei vertikaler Überlappung der Geometrieobjekte.

Nach der Segmentierung der Fassade in Stockwerke erfolgt die Unterteilung der Stockwerke in Kacheln. Dies geschieht durch vertikale Schnitte entlang der linken und rechten Begrenzungen der Geometrieobjekte. Dadurch entstehen Fassadeneinheiten, die entweder einen homogenen Wandbereich beschreiben oder ein Geometrieobjekt beinhalten. Sie lassen sich entsprechend als Wand- beziehungsweise Geometriekacheln interpretieren. Eine weitere räumliche Zerlegung von Kacheln ist in semantischer Hinsicht nicht sinnvoll; die Kacheln bilden die Grundeinheiten der Grammatik. Abbildung 5.3 zeigt beispielhaft die für den Datensatz „Alte Kanzlei“ detektierten Kacheln. Wand- und Geometriekacheln sind dabei in unterschiedlichen Grautönen dargestellt.

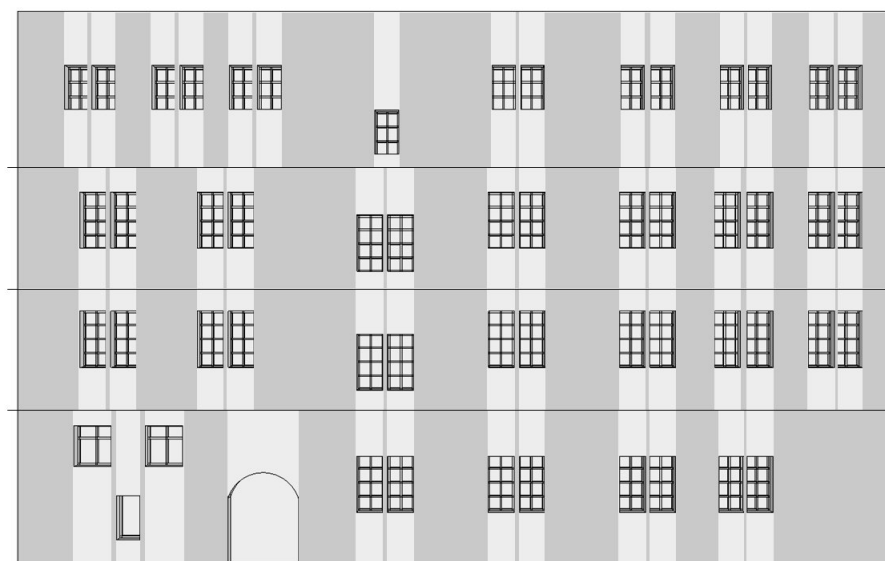


Abbildung 5.3: Segmentierung der Stockwerke in Kacheln am Beispiel „Alte Kanzlei, Stuttgart“.

Generell erhält man als Ergebnis der Fassadensegmentierung für jedes Stockwerk eine Abfolge von Wand- und Geometriekacheln. Dabei gilt die Definition:

Definition: Eine Sequenz von Wand- und Geometriekacheln heißt *topologisch korrekt*, wenn sie die folgende alternierende Form aufweist:

Wand, Geometrie, Wand, Geometrie, Wand, ..., Wand.

Topologisch korrekte Kachelsequenzen sind die Grundlage für die Bestimmung struktureller Beziehungen der Kacheln untereinander (siehe Abschnitt 5.2). Im Beispiel der Abbildung 5.3 ist die topologische Korrektheit für alle Stockwerke gewährleistet. Die geforderte Alternation von Wand- und Geometriekacheln ist jedoch dann nicht erfüllt, wenn innerhalb eines Stockwerks horizontal aneinanderstoßende oder überlappende Geometrieobjekte auftreten. Abbildung 5.4 veranschaulicht diesen Sachverhalt anhand der Konfigurationen (a), (b) und (c) und der zugehörigen Kachelsequenzen.

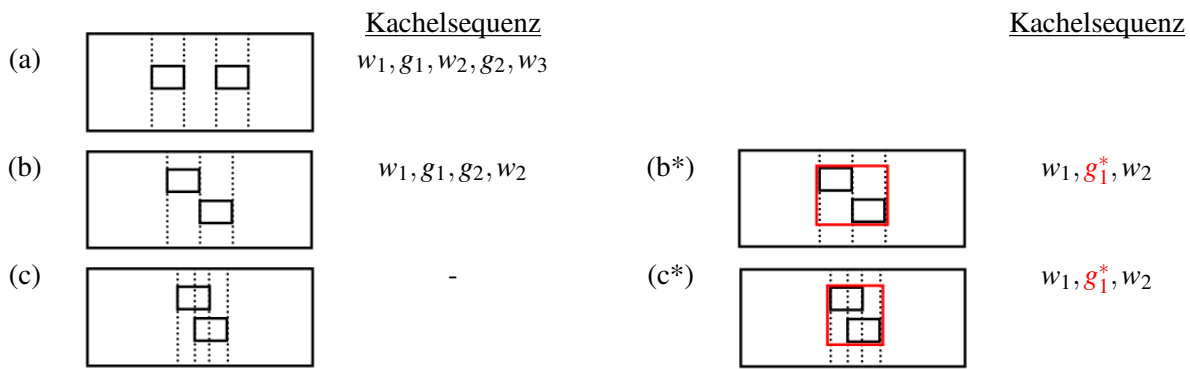


Abbildung 5.4: Fensteranordnungen und zugehörige Kachelsequenzen.

Während in Konfiguration (a) Wand- und Geometriekacheln abwechselnd auftreten und damit eine topologisch korrekte Folge darstellen, ist dies in den Fällen (b) und (c) nicht gegeben. In Anordnung (b) wird die Alternation durch das Aneinanderstoßen der Geometriekacheln g_1 und g_2 verhindert; für Konfiguration (c) kann durch die horizontale Überlappung der beiden Geometrieobjekte überhaupt keine sinnvolle Kachelsequenz angegeben werden. Um auch solche Fälle behandeln zu können, werden horizontal aneinanderstoßende oder sich überlappende Geometrieobjekte eines Stockwerks zu einem sogenannten *komplexen Geometrieobjekt* zusammengefasst. Die räumliche Ausdehnung eines komplexen Geometrieobjekts entspricht einem Quader, der die betreffenden Geometrieobjekte minimal umschließt. Es beinhaltet alle 3D-Körper, die innerhalb dieses minimal umschließenden Quaders liegen. Die Konfigurationen (b*) und (c*) der Abbildung 5.4 stellen nach Erzeugung des komplexen Geometrieobjekts g_1^* die topologisch richtigen Versionen der Fälle (b) und (c) dar.

5.1.2 Klassifizierung der Kacheln

Die bereits beschriebene räumliche Zerlegung der Gebäudefassade führt zu einer Vielzahl von Wand- und Geometriekacheln. Ähnliche Kacheln werden mit Hilfe einer Clusteranalyse zu Klassen zusammengefasst. Diese Klassifizierung bringt zwei Vorteile mit sich. Zum einen können Ungenauigkeiten bezüglich Geometrie und Lage der rekonstruierten Geometrieobjekte ausgeglichen werden. Zum anderen verhindert die Aggregation ähnlicher Kachelausprägungen zu einem gemeinsamen Kacheltyp eine zu große Anzahl von Terminalen und erleichtert somit die Suche nach strukturellen Beziehungen der Kacheln untereinander (siehe Abschnitt 5.2).

Die Klassifizierung der Kacheln erfolgt über ein sequentielles Clusterverfahren, das nacheinander alle Kacheln abarbeitet und dabei sukzessive Cluster aufbaut. Dazu werden die Kacheln zunächst in einen geeigneten Merkmalsraum transformiert. Im Merkmalsraum ist jede Kachel durch einen Punkt repräsentiert; der Abstand zwischen

diesen Punkten kann als Ähnlichkeitsmaß interpretiert werden, wobei minimale Distanz für größte Ähnlichkeit steht. Zur Beschreibung des Clusteralgorithmus werden folgende Definitionen und Bezeichnungen eingeführt: Kacheln werden allgemein mit $k_i, (i = 1, \dots, n)$ abgekürzt; ein Cluster $C_p = \{k_i, \dots\}$ mit $(p = 1, \dots, m)$ stellt eine nicht leere Menge von Kacheln dar, das zugehörige Clusterzentrum wird mit C_p^0 bezeichnet; die Distanzfunktion $d(k_j, C_p^0)$ gibt den Abstand zwischen der Kachel k_j und dem Zentrum des Clusters C_p zurück; t ist ein Schwellwert, der den maximal erlaubten Abstand einer Kachel zu ihrem Clusterzentrum angibt. Algorithmus 5.1 stellt die Clustermethode als Pseudocode dar. Nach der Festlegung des Schwellwerts (Zeile 1) beginnt das Verfahren, indem das erste Cluster mit der zuerst betrachteten Kachel belegt wird (Zeile 2). Nacheinander wird für jede weitere Kachel die Distanz zum jeweils nächstgelegenen Cluster ermittelt (Zeile 4). Ist der Abstand größer als der Schwellwert, wird für die betreffende Kachel ein neues Cluster eröffnet (Zeile 5). Andernfalls kann sie dem nächstgelegenen Cluster zugeordnet werden; das Clusterzentrum ist entsprechend zu aktualisieren.

Algorithmus 5.1 Sequentielles Clustern

```

1  Input:  $t$ 
2  Initialize  $m = 1, C_m = \{k_1\}$ 
3  For  $i = 2$  to  $n$ 
4      $C_q = \arg \min_{1 \leq p \leq m} \{d(k_i, C_p^0)\}$ 
5     If  $d(k_i, C_q^0) > t$  then  $m = m + 1$  and  $C_m = \{k_i\}$ 
6     Else  $C_q = C_q \cup \{k_i\}$  and update  $C_q^0$ 

```

Als Abstandsmaß im Merkmalsraum wird die Euklidische Distanz $d(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$ verwendet, wobei \mathbf{x} und \mathbf{y} zwei Punkte im n -dimensionalen Raum darstellen. Der Merkmalsraum selbst wird über die Kachelattribute bestimmt. Da Wandkacheln homogene Fassadenstücke sind, ist für deren Untersuchung lediglich das Attribut Abstand interessant, wodurch ein eindimensionaler Merkmalsraum aufgespannt wird. Im Gegensatz dazu ist bei der Klassifizierung der Geometrikacheln zusätzlich das Attribut Geometrieobjekt zu beachten. Zu diesem Zweck werden die Geometrikacheln zunächst in Gruppen einheitlicher Geometrieobjekte vorsortiert, bevor dann die Klassifizierung bezüglich des Abstands für jede dieser Gruppen getrennt vorgenommen wird. Die Voreinteilung der Geometrikacheln basiert auf der Klassifizierung der auftretenden Geometrieobjekte. Diese wird in zwei Schritten durchgeführt: Als erstes werden die Geometrieobjekte nach dem beschriebenen Cluster-Verfahren gemäß ihrer räumlichen Ausdehnung gruppiert. Die so entstandene Cluster-Einteilung wird schließlich in einem zweiten Schritt unter Berücksichtigung des Geometrieobjekt-Designs verfeinert. Unter dem *Design* eines Geometrieobjekts ist dabei nach Definition von Abschnitt 2.8 die Konfiguration der zugehörigen 3D-Körper zu verstehen.

Der Vergleich unterschiedlicher Geometrieobjekt-Designs erfolgt auf der Basis von Tiefenbildern, die im Vorfeld für alle Geometrieobjekte abgeleitet werden. Dies geschieht über eine Parallelprojektion, welche die Tiefeninformationen der Geometrieobjekte in bildhafte 2D-Daten überführt. Jedes Geometrieobjekt definiert dabei innerhalb der Fassadenebene einen rechteckigen abzubildenden Objektbereich. Über diesen Abbildungsbereich wird ein regelmäßiges 2D-Gitter gelegt, wobei ein Gitterelement auf genau ein Pixel des Tiefenbildes verweist. Die Rasterweite, in der das Objekt abgetastet werden soll, orientiert sich an der Größe der abzubildenden Strukturen. Das Abtasttheorem ist erfüllt, wenn die Rasterweite höchstens halb so groß ist wie die kleinste darzustellende Struktur innerhalb der Geometrieobjekt-Körper. Jede Rasterzelle projiziert nun einen auf der Fassadenebene senkrecht stehenden Strahl auf die Geometrieobjekt-Körper. Ein Strahlverfolgungsalgorithmus liefert die Distanz zwischen dem ersten Schnittpunkt und der Fassadenebene. Als Tiefenwert interpretiert kann dieser Abstand schließlich in einen Grauwert überführt und an der entsprechenden Stelle im Tiefenbild abgespeichert werden. Abbildung 5.5(oben) zeigt beispielhaft Geometrieobjekte, wie sie im Bereich des Schillerplatzes auftreten. Die dazugehörigen Tiefenbilder (Abbildung 5.5(unten)) wurden mit einer Rasterweite von 4 cm erzeugt. Die Grauwerte kodieren den Abstand zur Fassadenebene: Schwarze Flächen liegen in der Fassadenebene, weiße Flächen markieren die Rückwand der Geometrieobjekte.

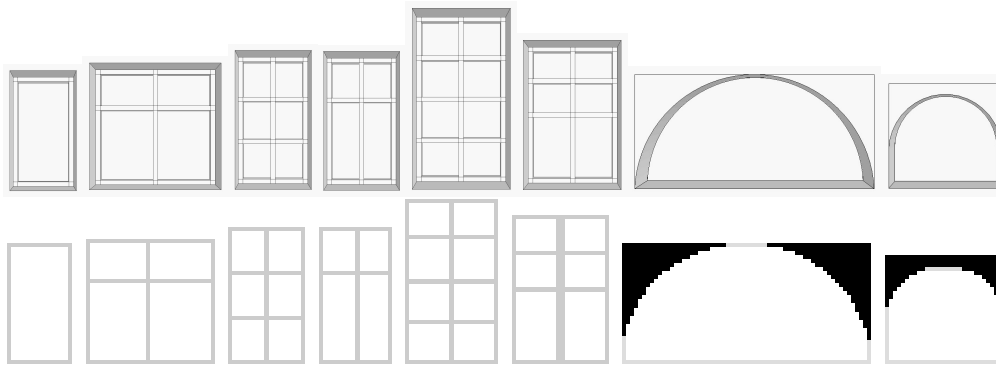


Abbildung 5.5: Geometrieobjekte (oben) und ihre Tiefenbilder (unten).

Die Ähnlichkeit der Tiefenbilder kann mit Hilfe des aus der Bildverarbeitung bekannten normierten Kreuzkorrelationskoeffizienten bewertet werden. Für zwei Bilder f und g berechnet sich dieser wie folgt (Luhmann, 2003):

$$\rho_{fg} = \frac{\sum [(f_i - \bar{f})(g_i - \bar{g})]}{\sqrt{\sum (f_i - \bar{f})^2} \cdot \sqrt{\sum (g_i - \bar{g})^2}}. \quad (5.1)$$

\bar{f} und \bar{g} stellen die arithmetischen Grauwertmittel der jeweiligen Bilder dar. Der Wertebereich des Koeffizienten ρ_{fg} erstreckt sich von -1 bis +1, wobei der Wert „+1“ größtmögliche Übereinstimmung anzeigt. Liegt der Kreuzkorrelationskoeffizient zweier Tiefenbilder oberhalb eines bestimmten Schwellwerts, werden die zugrunde liegenden Geometrieobjekt-Designs als hinreichend ähnlich, andernfalls als signifikant verschieden angenommen. Die Geometrieobjekte aus Abbildung 5.5 stellen jeweils Vertreter unterschiedlicher Geometrieobjekt-Klassen dar. Die Schwellwerte für die Klassifizierung nach Größe und Design orientieren sich an der geometrischen Genauigkeit des Fassadenmodells und am gewünschten Grad der Vereinheitlichung von Designs. Im Beispiel wurde ein Distanzschwellwert von 0.3 m beziehungsweise ein Korrelationsschwellwert von 0.85 verwendet.

Vorsortiert nach unterschiedlichen Geometrieobjekt-Klassen erfolgt schließlich die Klassifizierung der Geometrie-kacheln ebenso wie die der Wandkacheln auf Basis des Abstandattributs. Während der Abstand bei Wandkacheln die Kachelbreite beschreibt, ist bei Geometrie-kacheln die vertikale Distanz des Geometrieobjekts von der unteren Kachelbegrenzung gemeint (Abschnitt 2.8). Es ist somit möglich, dass sich Geometrie-kacheln ausschließlich durch die vertikale Position ihres Geometrieobjekts unterscheiden. Vertikale Versätze von Fenstern, wie sie beispielsweise an Treppenhäusern vorkommen, können so modelliert werden.

Als Ergebnis der Klassifizierung erhält man verschiedene Kacheltypen, denen jeweils ein Symbol zugeordnet wird. Wandkacheln werden mit w_i ($i \in 1, \dots, n$), Geometrie-kacheln mit g_i ($i \in 1, \dots, m$) bezeichnet. Zusammen repräsentieren sie die Menge der Terminale $T = \{w_1, \dots, w_n, g_1, \dots, g_m\}$ der Fassadengrammatik $G^{\text{Fassade}}(V, T, P, F)$. Mit Hilfe dieser Terminale kann das Fassadendesign durch eine Folge diskreter Symbole ausgedrückt werden. Eine solche Sequenz von Symbolen ist die Grundlage für das Auffinden von Beziehungen zwischen den Terminalen (siehe Abschnitt 5.2).

5.2 Beziehung zwischen den Terminalen

Nachdem die Grundelemente der Fassadengrammatik, die Terminale, bestimmt 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, abgeleitet in Abschnitt 5.1. Bestehende Algorithmen zur Strukturerkennung wie etwa SEQUITUR von Nevill-Manning und Witten (1997) arbeiten auf natürlich vorkommenden Zeichenketten, wie sie zum Beispiel in

Form von Sätzen in natürlicher Sprache oder als Aneinanderreihung von Notensymbolen in der Musik vorkommen. Entscheidend für die Arbeitsweise dieser Verfahren ist, dass bei natürlichen Zeichenketten keine Informationen über mögliche systematische Symbolabfolgen vorausgesetzt werden können. Die Zeichen werden in vordefinierter Reihenfolge untersucht unabhängig von ihrer Bedeutung.

Dementgegen steht der in dieser Arbeit entworfene Algorithmus, der keine natürlichen Zeichenketten, sondern Terminal-Sequenzen analysiert, deren topologische Korrektheit bereits bei ihrer automatischen Ableitung erzeugt wird (Abschnitt 5.1). Damit sind zum einen Kenntnisse über die Alternation der Symbole vorhanden, zum anderen weiß man um die Bedeutung sowie die geometrischen Eigenschaften der einzelnen Terminale. Dieses Vorwissen wird dazu genutzt, ein auf Zeichenketten basierendes Verfahren zur Strukturerkennung zu entwickeln, das an das Gebäudefassadenproblem bestmöglich angepasst ist. Der 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. Die Strukturerkennung beruht auf drei Bedingungen:

1. Die kleinste Einheit einer auf Redundanz zu untersuchenden Teilfolge ist ein Symbol-Tripel der Form (g, w, g) .
2. Kein Symbol-Tripel tritt mehr als einmal in der Terminal-Folge auf.
3. Die Reihenfolge, in der die Symbol-Tripel einer Sequenz auf Redundanz untersucht werden, hängt von der Breite ihres Wandkachel-Elements ab. Tripel mit schmalen Wandkacheln werden zuerst bearbeitet.

Bedingung 1 garantiert, dass es sich bei den extrahierten Strukturen um *abgeschlossene Fassadeneinheiten* handelt. Unter einer abgeschlossenen Fassadeneinheit ist eine endliche alternierende Kachelfolge zu verstehen, deren Anfang und Ende jeweils durch eine Geometrikachel markiert ist. Die kleinste mögliche Struktur ist demnach die mit dem Symbol-Tripel (g, w, g) bezeichnete Sequenz *Geometrikachel, Wandkachel, Geometrikachel*.

Bedingung 2 verbietet Redundanz durch die Forderung, dass sämtliche Symbol-Tripel in der Terminal-Sequenz nur einmal vorkommen dürfen. Sobald ein Symbol-Tripel mehrfach auftritt, wird es als Struktur interpretiert und durch ein die Struktur identifizierendes Nichtterminal-Symbol S ersetzt. Formal kann die Substitution von Zeichen als Ersetzungsregel $S \rightarrow g, w, \dots, g$ geschrieben werden. Geometrisch interpretiert bedeutet sie die Zusammenfassung mehrerer Kacheln der Fassade zu einer übergeordneten Kachel, die dadurch den Status eines Nichtterminals einnimmt.

Bedingung 3 ist motiviert durch das *Gesetz der Nähe*, eines der sogenannten Gestaltgesetze, in denen Erkenntnisse über die Wahrnehmung von Struktur zusammengefasst sind (Abschnitt 2.1). Nach dem Gesetz der Nähe werden eng beieinanderliegende Elemente als zusammengehörig wahrgenommen (Arnheim, 1974). Es handelt sich hierbei um ein Gruppierungsprinzip, das die perzeptive Strukturierung von Objekten auf der Basis ihrer Abstände erklärt. Übertragen auf die Strukturerkennung bei Gebäudefassaden, bedeutet dies, dass Geometrieobjekte, beispielsweise Fenster, mit geringen Abständen als Einheit empfunden werden. Bedingung 3 wendet dieses Prinzip an, indem die Strukturen über eine „Fein-zu-grob“-Suche extrahiert werden. Als Ergebnis erhält man Strukturen der Form $S_i = (g_l | S_j, w_m, g_n | S_k)$ mit $i \neq j, k$. Die hier verwendete Schreibweise folgt der in der Theorie der formalen Sprachen üblichen Notation. Eine Struktur ist damit definiert als ein Symbol-Tripel, bestehend aus einem Wandkachel-Tripel in der Mitte und jeweils einem Geometrikachel-Tripel beziehungsweise einem Struktur-Nichtterminal am Anfang und am Ende.

Algorithmus 5.2 stellt die Strukturerkennung als Pseudocode dar. Folgende Bezeichnungen werden dafür eingeführt: k_i beschreibt die i .te Kachel innerhalb einer Kachelsequenz $\kappa = (k_1, \dots, k_n)$. Der Index i benennt dabei keine unterschiedlichen Kacheltypen, sondern unterscheidet einzelne Kachelinstanzen. Mit κ^{comp} wird die komprimierte Kachelsequenz bezeichnet, die durch die sukzessive Elimination redundanter Teilfolgen aus κ entsteht. Programmzeilen, in welche die dem Algorithmus zugrunde liegenden Bedingungen einfließen, sind entsprechend kommentiert. Der 3. Bedingung wird gleich zu Beginn des Algorithmus Rechnung getragen, indem die Wandkacheln der gegebenen Kachelsequenz κ nach ihrer Breite aufsteigend sortiert werden (Zeile 1). Berücksichtigt

werden dabei alle Wandkacheln mit Ausnahme derjenigen, die sich am Fassadenrand befinden und damit nicht zwischen zwei Geometrikacheln liegen. Diese Einschränkung ist die Voraussetzung dafür, um die in Bedingung 1 definierte Syntax eines Symbol-Tripels einzuhalten. Die nach der Breite sortierten Wandkacheln werden in einer Liste zurückgegeben, über die sie im weiteren Verlauf des Algorithmus nacheinander abgearbeitet werden (Zeilen 3 bis 11). Ziel ist es, die Kachelsequenz κ^{comp} , initialisiert mit der originalen Kachelfolge $\kappa = (k_1, \dots, k_n)$ (Zeile 2), schrittweise zu komprimieren und die dabei eliminierten Teilfolgen als Strukturen abzuspeichern. Zu diesem Zweck wird für das jeweils aktuelle Listenelement w^{it} zunächst die Position i ermittelt, an der es in κ^{comp} steht (Zeile 4). Falls es nicht gefunden wird, bleibt i undefiniert und das nächste Listenelement wird untersucht (Zeile 5). Ist i bestimmt, kann darüber in κ^{comp} auf das Symbol-Tripel (k_{i-1}, k_i, k_{i+1}) zugegriffen werden. Mit den zu diesen Kacheln gehörigen Kacheltypen $(g_{\text{left}}, w, g_{\text{right}})$ wird schließlich die Struktur S_m initialisiert, deren äußere Form damit Bedingung 1 genügt (Zeilen 6 und 7). Tritt in κ^{comp} die Kachelfolge $(g_{\text{left}}, w, g_{\text{right}})$ mehr als einmal auf, wird diese überall durch das Symbol S_m ersetzt (Zeilen 8 und 9). Wie in Bedingung 2 gefordert, wird dadurch Redundanz beseitigt; κ^{comp} wird komprimiert.

Algorithmus 5.2 Strukturerkennung

```

1  w_list = SortWallTiles( $\kappa$ ) (Bedingung 3, Bedingung 1)
2  Initialize  $\kappa^{\text{comp}} = \kappa, m = 1, w^{\text{it}} = w\_list.begin()$ 
3  While ( $w^{\text{it}} \neq w\_list.end()$ )
4       $i = \kappa^{\text{comp}}.Get(w^{\text{it}})$ 
5      If (! $i$ ) then  $w^{\text{it}} = w^{\text{it}} + 1$  and continue
6       $g_{\text{left}} = \text{Type}(k_{i-1}), w = \text{Type}(k_i), g_{\text{right}} = \text{Type}(k_{i+1})$ 
7       $S_m = (g_{\text{left}}, w, g_{\text{right}})$  (Bedingung 1)
8      If ( $\kappa^{\text{comp}}.Redundant(g_{\text{left}}, w, g_{\text{right}})$ ) then
9           $\kappa^{\text{comp}}.Replace(g_{\text{left}}, w, g_{\text{right}}, S_m)$  (Bedingung 2)
10          $m = m + 1$ 
11          $w^{\text{it}} = w^{\text{it}} + 1$ 

```

Als Ergebnis liefert der beschriebene Algorithmus neben einer komprimierten Kachelsequenz eine Menge von Strukturen, die die hierarchische Ordnung der Kacheln ausdrücken. 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 5.6 veranschaulicht den Ablauf der Strukturerkennung am Beispiel des Datensatzes „Prinzenbau, Stuttgart“. Die zugehörigen Kachelsequenzen und Strukturen sind in den Formeln (5.2) bis (5.11) gegeben. Aus Gründen einer einfacheren Darstellung beschränkt sich das Beispiel auf ein einzelnes, für das Gebäude repräsentatives Stockwerk. Ausgangspunkt der Strukturerkennung ist das Ergebnis der datengetriebenen Fassadenrekonstruktion (Abbildung 5.6a) beziehungsweise die davon abgeleitete Kachelfolge (Formel (5.2)). Wand- und Geometrikacheln sind in Abbildung 5.6a zur besseren Unterscheidung in verschiedenen Grautönen eingefärbt. Der Algorithmus benötigt insgesamt drei Iterationen (Abbildung 5.6b-d), um sämtliche im Stockwerk enthaltenen Strukturen (Formeln (5.4), (5.7), (5.11)) aufzudecken. Die in der jeweiligen Iteration erkannte Struktur ist farblich gekennzeichnet. Deutlich werden dadurch typische Struktureigenschaften. Dazu zählen redundantes Auftreten und der Aufbau als Sequenz von je drei Fassadeneinheiten. Die horizontale Ausdehnung der Strukturen auf der Fassade wächst von Iteration zu Iteration. Indem Symboltripel durch einzelne Struktursymbole ersetzt werden, verkürzt sich die Kachelsequenz sukzessive, bis sie schließlich ihre endgültige, komprimierte Form erreicht hat (Formel (5.8)).

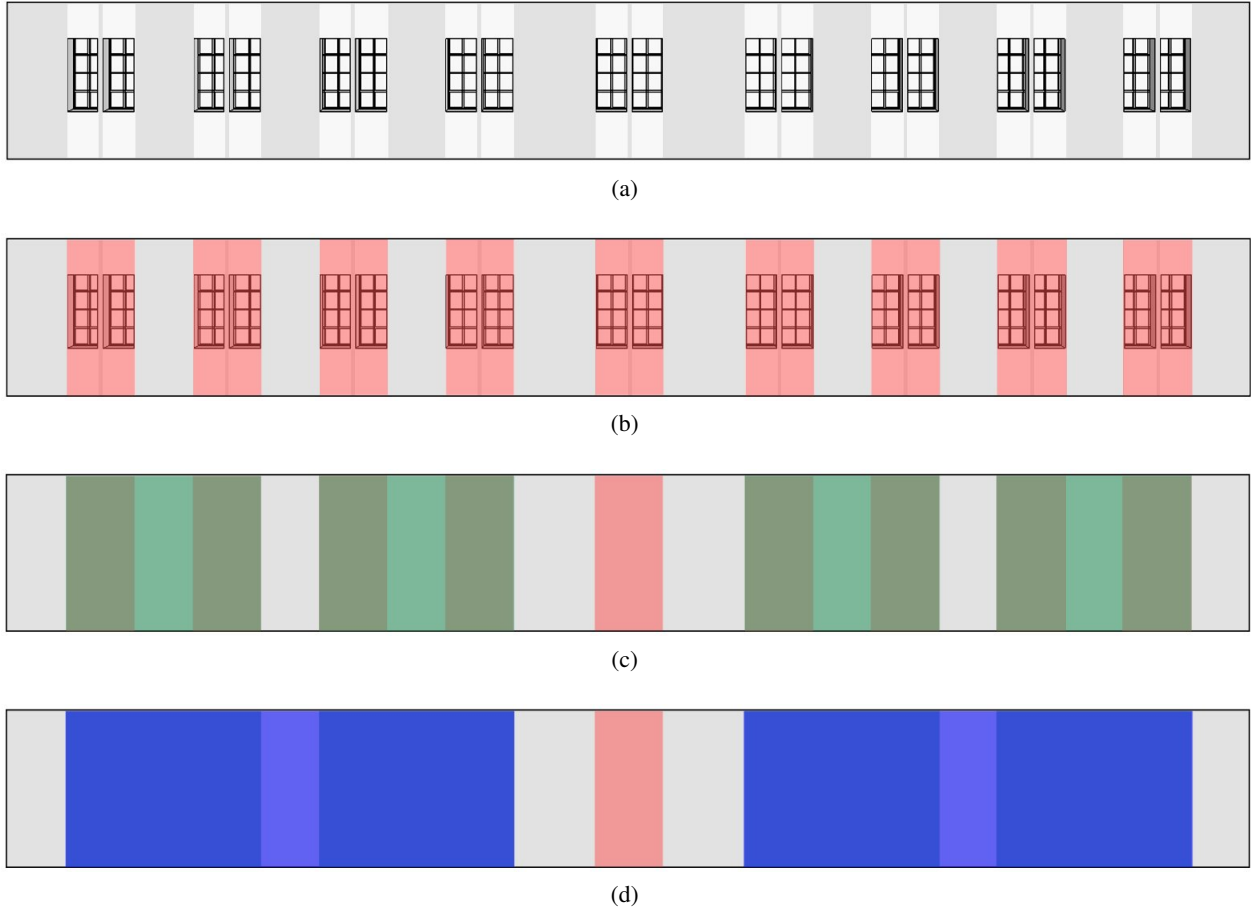


Abbildung 5.6: Strukturerkennung für das 1. Stockwerk des Gebäudes Prinzenbau.

$$(a) SW_1 \rightarrow w_1 g_1 w_3 g_1 w_1 g_1 w_3 g_1 w_1 g_1 w_3 g_1 w_1 g_1 w_3 g_1 w_2 g_1 w_3 g_1 w_2 g_1 w_3 g_1 w_1 g_1 w_3 g_1 w_1 g_1 w_3 g_1 w_1 g_1 w_3 g_1 w_1 \quad (5.2)$$

$$(b) SW_1 \rightarrow w_1 S_1 w_1 S_1 w_1 S_1 w_1 S_1 w_2 S_1 w_1 S_1 w_1 S_1 w_1 S_1 w_1 \quad (5.3)$$

$$S_1 \rightarrow g_1 w_3 g_1 \quad (5.4)$$

$$(c) SW_1 \rightarrow w_1 S_2 w_1 S_2 w_2 S_1 w_2 S_2 w_1 S_2 w_1 \quad (5.5)$$

$$S_1 \rightarrow g_1 w_3 g_1 \quad (5.6)$$

$$S_2 \rightarrow S_1 w_1 S_1 \quad (5.7)$$

$$(d) SW_1 \rightarrow w_1 S_3 w_2 S_1 w_2 S_3 w_1 \quad (5.8)$$

$$S_1 \rightarrow g_1 w_3 g_1 \quad (5.9)$$

$$S_2 \rightarrow S_1 w_1 S_1 \quad (5.10)$$

$$S_3 \rightarrow S_2 w_1 S_2 \quad (5.11)$$

Aus den ineinander verschachtelten Strukturen ergibt sich eine hierarchische Anordnung der Fassadenelemente. Diese lässt sich graphisch als Ableitungsbaum darstellen. Wie aus Abschnitt 2.2 bekannt, repräsentiert ein Ableitungsbaum eine Folge von Produktionsanwendungen auf ein Startsymbol und wird demzufolge von der Wurzel bis zu den Blättern aufgebaut (siehe auch Abschnitt 6.1.1). Im Gegensatz dazu geschieht die Konstruktion hier beginnend bei den Blättern in umgekehrter Richtung. Jedes Fassadendesign verkörpert mit seiner zugehörigen Kachelsequenz ein Wort der auf der Fassadengrammatik beruhenden Sprache. Es kann interpretiert werden als Front eines Ableitungsbaumes, der im Verlauf der Strukturerkennung sukzessive aufgebaut wird. Abbildung 5.7 veranschaulicht diesen Prozess. Zu Beginn der Strukturerkennung besteht der Baum aus genau zwei Ebenen: der Front, die von links nach rechts gelesen die Kachelfolge ergibt, und der Wurzel, welche im gegebenen Beispiel das Nichtterminal SW_1 darstellt (Abbildung 5.7a). Jede Iteration der Strukturerkennung führt zu einer Erweiterung des Ableitungsbaumes um eine zusätzliche Ebene (Abbildung 5.7b-d). Sei gemäß der Notation aus Abschnitt 2.2 $\kappa \in (V \cup T)^*$ eine Zeichenkette, die sowohl aus Terminalen als auch aus Nichtterminalen bestehen kann, dann lautet eine Struktur $S_i = (g_l | S_j, w_m, g_n | S_k)$ in verkürzter Schreibweise $S_i = \kappa_i$ mit $|\kappa_i| \geq 3$. Betrachtet man κ_i als Satzform, das heißt als Ergebnis einer Ableitung, kann für die betreffende Struktur ein Teilbaum mit Front κ_i und Wurzel S_i konstruiert werden. Auf dieser Grundlage lässt sich die Erweiterung des Ableitungsbaumes in der i -ten Iteration der Strukturerkennung algorithmisch folgendermaßen beschreiben: (1) Erzeuge für die detektierte Struktur $S_i = \kappa_i$ einen Teilbaum mit Front κ_i und Wurzel S_i ; (2) Platziere an allen Stellen κ_i des Ableitungsbaumes den Teilbaum mit Wurzel S_i und erhalte wieder einen korrekten Ableitungsbaum. Die Abbildungen 5.7b-d zeigen den aktuellen Zustand des Ableitungsbaumes nach den einzelnen Iterationen. Die jeweils eingefügten Teilbäume sind analog zu Abbildung 5.6 in den Farben ihrer Strukturen markiert.

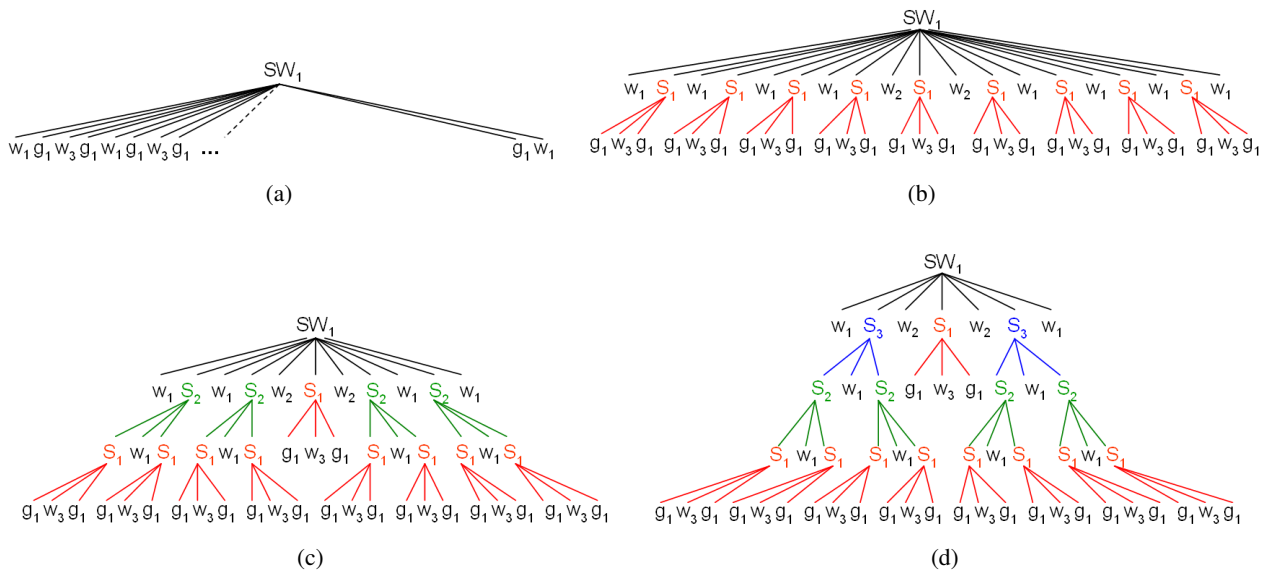


Abbildung 5.7: Aufbau des Ableitungsbaums für das 1. Stockwerk des Prinzenbaus.

Aus dem Ergebnis der Strukturerkennung sind weitere Informationen ableitbar, die für den in Abschnitt 6.1 behandelten Produktionsprozess relevant sind. So kann beispielsweise die komprimierte Kachelsequenz dazu verwendet werden, vertikale Symmetrien im Fassadendesign aufzudecken. Dazu muss lediglich die Kachelfolge mit ihrer gespiegelten Version verglichen werden. Das Wissen um eventuelle Symmetrien kann bei der Erzeugung neuer Fassadendesigns gezielt genutzt werden. Auf der Basis des Ableitungsbaumes kann für jedes Terminal beziehungsweise Nichtterminal ein Hierarchiewert angegeben werden. Dieser speichert den Rang, den das betreffende Fassadenelement innerhalb der hierarchischen Ordnung einnimmt. Er drückt somit dessen Priorität aus und wird innerhalb des Produktionsprozesses bei der Auswahl der Regeln benötigt (siehe Abschnitt 6.1.2). Der Hierarchiewert entspricht der Nummer der höchsten Ebene, auf der das jeweilige Terminal oder Nichtterminal auftritt. Die Ebenen

des Ableitungsbaumes sind von der Front zur Wurzel hin durchnummeriert. Für die Terminale und Nichtterminale des Beispiels aus Abbildung 5.7d ergeben sich folgende Hierarchiewerte:

	w_1	w_2	w_3	g_1	S_1	S_2	S_3
Hierarchiewert	4	4	3	3	4	3	4

Tabelle 5.1: Hierarchiewerte der Fassadenelemente für das 1. Stockwerk des Prinzenbaus.

5.3 Ableitung von Produktionsregeln

In den Abschnitten 5.1 und 5.2 wurde mit der Bestimmung der Terminale $T = \{w_1, \dots, w_n, g_1, \dots, g_m\}$ (*Kurzschreibweise: $T = \{w, g\}$*) und Nichtterminale $V = \{W, G, S_1, \dots, S_q, F\}$ (*Kurzschreibweise: $V = \{W, G, S, F\}$*) bereits die Grundlage der Fassadengrammatik $G^{\text{Fassade}}(V, T, P, F)$ gelegt. Darauf aufbauend lassen sich nun die noch fehlenden Produktionen $P = \{p_1, \dots, p_p\}$ ableiten. Die Syntax ihrer allgemeinen Form ist in der für die L-Systeme eingeführten Notation in Formel (2.1) gegeben. Bei der Definition der Produktionen nehmen die Attribute, mit denen die beteiligten Elemente versehen sind, eine entscheidende Rolle ein. Jedem Terminal $k \in T$ sowie jedem Nichtterminal $K \in V$ ist ein Vektor von Attributen zugeordnet, bezeichnet mit $\sigma(k) = (\sigma_1, \sigma_2, \dots)$, $\sigma(k) \in \Omega_k$ für Terminalattribute beziehungsweise $\Sigma(K) = (\Sigma_1, \Sigma_2, \dots)$, $\Sigma(K) \in \Omega_K$ für Nichtterminalattribute. Ω_k und Ω_K stellen dabei die jeweiligen Attributräume dar. Die Mengen der Terminale und Nichtterminale lassen sich damit schreiben als:

$$T = \{(w, \sigma(w)), (g, \sigma(g)) : \sigma(w) \in \Omega_w, \sigma(g) \in \Omega_g\}$$

$$V = \{(W, \Sigma(W)), (G, \Sigma(G)), (S, \Sigma(S)), (F, \Sigma(F)) : \Sigma(W) \in \Omega_W, \Sigma(G) \in \Omega_G, \Sigma(S) \in \Omega_S, \Sigma(F) \in \Omega_F\}.$$

Die Attribute $\sigma(k)$ und $\Sigma(K)$ beschreiben sowohl die räumliche Ausdehnung der zugrunde liegenden Fassadenbereiche als auch die Hierarchie beziehungsweise den Rang, den die jeweiligen Kacheln innerhalb des beobachteten Fassadendesigns einnehmen. Für die unterschiedlichen Kategorien von Terminalen und Nichtterminalen lauten sie:

$$\sigma(g) = (\text{Breite}, \text{Höhe}, \text{Hierarchie}) \quad (5.12)$$

$$\sigma(w) = (\text{Breite}, \text{Höhe}, \text{Hierarchie}, \text{Linkshierarchie}, \text{Rechtshierarchie}) \quad (5.13)$$

$$\Sigma(G) = (\text{Breite}, \text{Höhe}, \text{Hierarchie}) \quad (5.14)$$

$$\Sigma(W) = (\text{Breite}, \text{Höhe}) \quad (5.15)$$

$$\Sigma(S) = (\text{Breite}, \text{Höhe}, \text{Hierarchie}) \quad (5.16)$$

$$\Sigma(F) = (\text{Breite}, \text{Höhe}) \quad (5.17)$$

Das Attribut *Höhe* legt die vertikale Ausdehnung der zugehörigen Kachel fest und entspricht damit der Höhe des Stockwerks, in dem die Kachel zu liegen kommt. Die *Breite* ergibt sich bei Wandkacheln aus dem Kachelattribut Abstand, bei Geometrikacheln aus der horizontalen Ausdehnung des zugehörigen Geometrieobjekts. Für Strukturen S stellt sie die Summe der Breiten aller beteiligten Kacheln dar. Im Fall des Axioms F beziehen sich Breite und Höhe auf das zugrunde liegende Fassadenpolygon. Das Attribut *Hierarchie* ist ein Ergebnis der Strukturerkennung (Abschnitt 5.2) und bezeichnet die höchste Ebene, die das betreffende Element innerhalb der hierarchischen Kachelanordnung einnimmt. Das Nichtterminal G besitzt maximale Hierarchie. Mit der *Linkshierarchie* und *Rechtshierarchie* eines Wandelements w sind die maximal auftretenden Hierarchiewerte des jeweils linken und rechten Nachbarn aller Instanzen von w gemeint. Während einige Attribute bereits bei der Terminal- und Strukturableitung Werte zugewiesen bekommen (Formeln (5.12) bis (5.17): Attribute in schwarzer Schrift), bleiben andere zunächst undefiniert und werden erst bei Anwendung der Produktionen besetzt (Formeln (5.12) bis (5.17): Attribute in blauer Schrift).

Generell lassen sich auf die Attribute logische und arithmetische Operatoren anwenden, die dann in Form von Bedingungen und arithmetischen Ausdrücken in die Produktionen einfließen. Analog zu den Bezeichnungen, die bei den parametrischen L-Systemen verwendet wurden (Abschnitt 2.4.1), sei hier $\sigma \cup \Sigma$ die Menge aller Terminal- und Nichtterminal-Attribute. Unter σ^* und Σ^* ist jeweils die Gesamtheit aller endlichen Folgen über σ beziehungsweise Σ zu verstehen. $C(\sigma \cup \Sigma)$ beschreibt die Menge aller logischen, $E(\sigma \cup \Sigma)$ die Menge aller arithmetischen Ausdrücke über $\sigma \cup \Sigma$. Auf dieser Basis lässt sich die Darstellung der allgemeinen Produktionsform (Formel (2.1)) weiter konkretisieren:

$$p_i : \kappa_l < K > \kappa_r : c \rightarrow \kappa : P(\mathbf{x}|p_i). \quad (5.18)$$

Die Produktion, bezeichnet durch p_i , überführt das Nichtterminal $K \in (V \times \Sigma^*)$ in die Kachelsequenz $\kappa \in ((T \cup V) \times E(\sigma \cup \Sigma)^*)^*$. Die Symbole $\kappa_l, \kappa_r \in ((T \cup V) \times (\sigma \cup \Sigma)^*)^*$ beschreiben den Kontext, in dem das zu substituierende Nichtterminal K steht. Die Produktion ist mit der Wahrscheinlichkeit $P(\mathbf{x}|p_i)$ versehen und darf angewendet werden, falls die Bedingung $c \in C(\sigma \cup \Sigma)$ erfüllt ist. Entstehung, Aufbau und Funktion der abgeleiteten Produktionen werden in Abschnitt 5.3.1 erläutert; mit den Eigenschaften der Regeln befasst sich Abschnitt 5.3.2.

5.3.1 Aufbau und Funktion der Produktionsregeln

Die Detektion von Terminalen und Strukturen mündet in eine Menge von Produktionen, die entweder als Split- oder Instanziierungsregel interpretiert werden können. Während Split-Regeln den Segmentierungsprozess der Fassade nachempfinden, erzeugen Instanziierungsregeln reine Terminalfolgen, auf deren Grundlage geometrische Instanzen der zu den jeweiligen Kacheln gehörigen Geometrieobjekte generiert werden können. Darüber hinaus ist eine Differenzierung der Produktionen nach ihrer Entstehung möglich. Auf dieser Grundlage lassen sich folgende sechs Produktionstypen unterscheiden:

Typ 1: Split-Regel für horizontale Teilungen

$$p_1 : F : c_1 \rightarrow W^*$$

$$c_1 : \text{Höhe}(F) \geq \min_{i=1, \dots, s} (h_i) + \text{puffer}$$

$$e_1 : \text{Höhe}(W^i) = \begin{cases} h_1 & \text{für } i = 1 \\ \max_{j=2, \dots, s-1} (h_j) & \text{für } 2 \leq i < m \\ h_s & \text{für } i = m \end{cases}$$

Typ 2: Split-Regel für vertikale Teilungen

$$p_2 : W : c_2 \rightarrow WGW : P(\mathbf{x}|p_2)$$

$$c_2 : ?\text{BEREICH} \geq 2 * \min_{i=1, \dots, n_w} (\text{Breite}(w_i)) + \min_{i=1, \dots, n_g} (\text{Breite}(g_i)) + \text{puffer}$$

$$e_{21} : \text{Höhe}(W^N) = \text{Höhe}(W^V)$$

$$e_{22} : \text{Höhe}(G) = \text{Höhe}(W^V)$$

$$e_{23} : \text{Breite}(W^V) = \text{Breite}(?\text{BEREICH})$$

Typ 3: Instanziierungsregel für Strukturen (Strukturregel)

$$p_3 : G : c_3 \rightarrow S_i : P(\mathbf{x}|p_3)$$

$$c_3 : ?\text{BEREICH} \geq \text{Breite}(S_i) + \text{puffer}$$

$$e_{31} : \text{Höhe}(S_i) = \text{Höhe}(G)$$

$$e_{32} : \text{Breite}(G) = \text{Breite}(?\text{BEREICH})$$

Typ 4: Instanziierungsregel für Geometriekacheln

$$\begin{aligned}
 p_4 : G : c_4 &\rightarrow g_i : P(\mathbf{x}|p_4) \\
 c_4 : ?BEREICH &\geq \text{Breite}(g_i) + \text{puffer} \\
 e_{41} : \text{Höhe}(g_i) &= \text{Höhe}(G) \\
 e_{42} : \text{Breite}(G) &= \text{Breite}(?BEREICH)
 \end{aligned}$$

Typ 5: Instanziierungsregel für Wandkacheln

$$\begin{aligned}
 p_5 : \mathcal{K}_l < W > \mathcal{K}_r : c_5 &\rightarrow w_i : P(\mathbf{x}|p_5) \\
 c_5 : ?BEREICH &\geq \text{Breite}(w_i) + \text{puffer} \wedge \\
 &\text{Hierarchie}(\mathcal{K}_l) \leq \text{Linkshierarchie}(w_i) \wedge \\
 &\text{Hierarchie}(\mathcal{K}_r) \leq \text{Rechtshierarchie}(w_i) \\
 e_{51} : \text{Höhe}(w_i) &= \text{Höhe}(W) \\
 e_{52} : \text{Breite}(W) &= \text{Breite}(?BEREICH)
 \end{aligned}$$

Typ 6: Instanziierungsregel zur Spiegelung von Kachelfolgen (Symmetrieregeln)

$$\begin{aligned}
 p_6 : \kappa_l^{(n)} < W > \varepsilon : c_6 &\rightarrow \kappa_{-l}^{(n-1)} : P(\mathbf{x}|p_6) \\
 c_6 : ?BEREICH &\geq \sum_{i=1}^{n-1} \text{Breite}(k_i) + \text{puffer} \\
 e_{61} : \text{Breite}(W) &= \text{Breite}(?BEREICH)
 \end{aligned}$$

Die Produktionen p_1 und p_2 resultieren aus der Zerlegung der beobachteten Gebäudefront in diskrete Fassadenbereiche (Abschnitt 5.1.1). Sie modellieren die dabei durchgeführten Teilungsoperationen als Split-Regeln. Regel p_1 repräsentiert die horizontale Unterteilung der Fassade in Stockwerke. Als Startpunkt aller Ersetzungen stellt die Fassade F das Axiom der Grammatik dar. Die Stockwerke entsprechen zu diesem Zeitpunkt jeweils einer einzelnen nichtterminalen Wandkachel W . Ähnlich dem Wiederholungs-Split, wie ihn Müller et al. (2006b) zur Fassadensegmentierung durchführen (Abschnitt 2.7), werden hier so viele Folgeelemente W eingefügt, wie Platz zur Verfügung steht. Die Notation W^* steht für die Kleenesche Hülle und bezeichnet hier die null- bis mehrfache Wiederholung des Elements W . Produktion p_2 reflektiert die vertikale Partitionierung der Stockwerke in Kacheln. Eine Wandkachel W , die zu Beginn für ein ganzes Stockwerk steht, wird durch die Folge *Wandkachel, Geometriekachel, Wandkachel* (WGW) überschrieben. Durch rekursive Anwendung von p_2 kann eine beliebig lange Kachelsequenz erzeugt werden.

Jede in Abschnitt 5.2 detektierte Struktur kann in eine Regel der Form p_3 überführt werden. Dieser Produktionstyp definiert die Ersetzung einer nichtterminalen Geometriekachel G durch eine Struktur S_i . Hinter dem Nichtterminal S_i verbirgt sich ein Symboltripel bestehend aus den Elementen $g_l|S_j, w_m, g_n|S_k$ mit $i \neq j, k$. Durch sukzessive Substitution aller auftretender Struktursymbole durch ihre jeweiligen Symboltripel lassen sich eventuelle Verschachtelungen lösen, so dass sich S_i als reine Terminalsequenz darstellt. Die Produktion p_3 beschreibt demnach den Übergang eines Nichtterminals in eine Folge geometrisch definierter Terminale und gehört folglich der Gruppe der Instanziierungsregeln an.

Zu den Instanziierungsregeln zählen auch die Produktionen p_4 und p_5 , bei denen jeweils ein Nichtterminal G oder W in genau ein Terminalsymbol übergeht. Jedes in Abschnitt 5.1 erkannte Terminal resultiert in einer Regel der Form p_4 , falls es sich um eine Geometriekachel g_i handelt, beziehungsweise einer Produktion des Typs p_5 im Falle einer Wandkachel w_i .

Die Produktion p_6 ist ein Ergebnis der Strukturerkennung, die neben einer hierarchischen Anordnung von Strukturen auch eventuelle vertikale Symmetrien offenbart (Abschnitt 5.2). Eine zur Mitte hin symmetrische Kachelsequenz wird erzeugt, indem das Nichtterminal W , welches das rechte Ende ($\varepsilon =$ leere Zeichenkette) der Kachelfolge $\kappa_l^{(n)}$ markiert, durch die gespiegelte Version $\kappa_{-l}^{(n-1)}$ ersetzt wird. Die genannten Kachelfolgen sind dabei definiert als $\kappa_l^{(n)} = (k_1, \dots, k_n)$ beziehungsweise $\kappa_{-l}^{(n-1)} = (k_{n-1}, \dots, k_1)$ mit $n > 1$ und $k_i \in T$. Da hier ausschließlich Terminale auftreten, handelt es sich auch bei p_6 um eine Instanzierungsregel.

Die aufgeführten Produktionstypen weisen Eigenschaften auf, die in Abschnitt 2.4.1 am Beispiel der L-Systeme eingeführt wurden. Sie sind parametrisch, umgebungssensitiv, teilweise kontextsensitiv und mit einer Wahrscheinlichkeit behaftet. Abschnitt 5.3.2 geht im Detail auf die genannten Eigenschaften ein, indem die einzelnen Komponenten der Produktionen - die Wahrscheinlichkeiten P , die Bedingungsgleichungen c und die Attributzuweisungsfunktionen e - näher erläutert werden.

5.3.2 Eigenschaften der Produktionsregeln

Ähnlich den bei parametrischen L-Systemen auftretenden Modulen (Abschnitt 2.4.1) sind die Terminale und Nichtterminale der Fassadegrammatik durch Attribute parametrisiert, die in den Bedingungsgleichungen c und Attributzuweisungsfunktionen e der Produktionen berücksichtigt werden. Die Produktionen können demnach als *parametrisch* bezeichnet werden. In den Attributzuweisungsfunktionen werden die Attribute von Nachfolgerelementen gesetzt, indem sie entweder von bereits festen Attributen ihres Vorgängers übernommen (Gleichungen $e_{21}, e_{22}, e_{31}, e_{41}, e_{51}$) oder aus zuvor abgeleiteten Parametern berechnet werden (Gleichung e_1). So wird beispielsweise in den Gleichungen e_{21} und e_{22} die Höhe der Vorgängerkachel direkt an die Höhe der Nachfolgerkacheln propagiert. Zur Unterscheidung von gleichlautenden Vorgänger- und Nachfolgersymbolen sind die betreffenden Zeichen mit einem hochgestellten V beziehungsweise N versehen. Bei e_1 berechnen sich die Höhen der durch horizontale Schnitte entstandenen Wandkacheln W^i ($i = 1, \dots, m$) aus den in Abschnitt 5.1.1 ermittelten Stockwerkshöhen h_i ($i = 1, \dots, s$). Noch nicht besetzte Attribute von Vorgängerelementen lassen sich mit Hilfe einer Bereichsabfrage bestimmen (Gleichungen $e_{23}, e_{32}, e_{42}, e_{52}, e_{61}$), die insbesondere in den Bedingungen der Produktionen eine Rolle spielt und in diesem Zusammenhang im Folgenden näher erklärt wird.

Die Bedingungen der Produktionen garantieren, dass für die durchzuführende Ersetzung genügend Platz auf der Fassade zur Verfügung steht. Jedes Vorgängerelement einer Produktion beschreibt einen Bereich auf der Fassade, in den die Kacheln der Nachfolgerelemente eingefügt werden. Regel p_1 modelliert das Einsetzen einzelner Stockwerke in das Fassadenpolygon. Entsprechend entscheidet in der Bedingung c_1 die Fassadenhöhe darüber, ob eine Substitution möglich ist oder nicht. Dementgegen stehen die zu den Produktionen p_2 bis p_6 gehörigen Bedingungen c_2 bis c_6 , bei denen jeweils die horizontale Ausdehnung des Einfügebereichs der ausschlaggebende Faktor ist. Während einer Folge von Produktionsanwendungen ändert sich der geltende Einfügebereich ständig. Er ist abhängig vom aktuellen Zustand der modellierten Kachelfolge bezüglich ihrer Umgebung, der Fassadenbegrenzung. Die Breite des Einfügebereichs wird als Attribut eines speziellen Anfragemoduls, bezeichnet mit $?BEREICH(Breite)$, definiert. Sie bleibt zunächst unbestimmt und wird erst bei Aufruf des Anfragemoduls ermittelt. Auf diese Weise entsteht eine Abhängigkeit der Regelanwendung von der Umgebung; die Produktionen werden *umgebungssensitiv*. Die Bedingungen c_1 bis c_6 enthalten jeweils die Puffervariable *puffer*, deren Bedeutung und Wirkung in Abschnitt 6.2 diskutiert wird.

Während sich die Bedingungen c_i ($i = 1, 2, 3, 4, 6$) ausschließlich auf die geometrischen Attribute der Terminale und Nichtterminale beziehen, berücksichtigt c_5 zusätzlich Hierarchie-Attribute. Die zu c_5 gehörige Produktion p_5 beschreibt die Substitution einer nichtterminalen Wandkachel durch eine terminale. Neben der Forderung, dass der Einfügebereich groß genug sein muss, wird das Nichtterminal W jedoch nur dann durch w_i ersetzt, wenn dessen Links- und Rechtshierarchie nicht kleiner sind als der jeweilige Hierarchiewert des linken und rechten Nachbarn von W . Die Berücksichtigung des Kontexts $\mathcal{H}_l, \mathcal{H}_r \in ((T \cup V) \times (\sigma \cup \Sigma)^*)$, in dem das Vorgängerelement steht, macht die Produktion *kontextsensitiv*. Auf diese Weise wird verhindert, dass bei der Produktionsanwendung neuartige, im Sinne der beobachteten Fassade unrealistische Strukturen erzeugt werden. Beispielsweise kann eine Wandkachel w_i , die in der beobachteten Fassade ausschließlich innerhalb einer größeren Struktur S_j auftritt, keine zwei

Strukturen des Typs S_j miteinander verbinden. Im konkreten Beispiel des Datensatzes Prinzenbau (Abbildung 5.6) bedeutet dies, dass etwa die schmale Wandkachel w_3 (mit Linkshierarchie = Rechtshierarchie = 3) keine Elemente mit Hierarchie > 3 verbinden darf. Möglich ist demnach die Teilfolge $\dots g_1^{(3)} w_3 g_1^{(3)} \dots$; die Hierarchiewerte des linken und rechten Kontexts von w_3 sind hier zur besseren Interpretation jeweils in Klammern als hochgestellte Indizes hinzugefügt. Nicht erlaubt sind unter anderem die Teilfolgen $\dots S_1^{(4)} w_3 g_1^{(3)} \dots$ oder $\dots S_1^{(4)} w_3 S_1^{(4)} \dots$, wodurch in diesem Fall monotone Aneinanderreihungen eines Fensterelements vermieden werden. Die zu den genannten Teilfolgen gehörigen Fassadenausschnitte sind in Abbildung 5.8 skizziert.

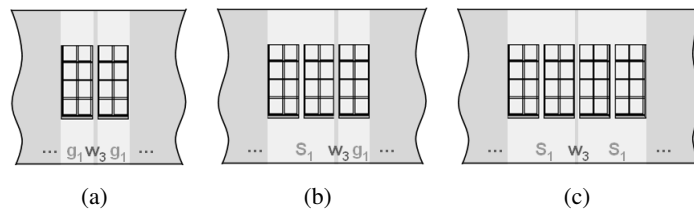


Abbildung 5.8: Teilfolgen, die in der Prinzenbau-Grammatik bezüglich der in Bedingung c_5 definierten Kontextsensitivität erlaubt sind (a), beziehungsweise nicht erzeugt werden können (b,c).

Die Produktionen p_i ($i = 2, 3, 4, 5, 6$) sind *wahrscheinlichkeitsbehaftet*: Sie besitzen die bedingte Wahrscheinlichkeit $P(\mathbf{x}|p_i)$. Diese beschreibt die Wahrscheinlichkeit einer Position \mathbf{x} auf der Fassade, unter der Voraussetzung, dass Regel p_i angewendet wird. \mathbf{x} ist ein zweidimensionaler Vektor, der eine Position auf der Fassadenebene angibt. Die erste Komponente entspricht dabei der x -Koordinate bezüglich des lokalen Koordinatensystems, die zweite Komponente repräsentiert die Stockwerksnummer $r \in \{1, \dots, s\}$. Prinzipiell sind für die Festlegung der Wahrscheinlichkeit $P(\mathbf{x}|p_i)$ unterschiedliche Strategien denkbar. Die hier vorgestellte Herangehensweise folgt dem übergeordneten Ziel, mit den abgeleiteten Produktionsregeln später realistische, zum Stil des beobachteten Gebäudes passende Fassadenstrukturen erzeugen zu können. Ein Weg, dies zu realisieren, ist, die Verteilung der Kacheln auf der vorliegenden Fassade möglichst exakt in Wahrscheinlichkeiten abzubilden und so auf die Produktionsregeln zu übertragen. Weitere Maßnahmen, die im Zeichen der Generierung realistischer Strukturen stehen, sind in Abschnitt 6.1.2 zu finden. Wie sich Änderungen bezüglich der Wahrscheinlichkeiten von Produktionen auf das Ergebnis einer grammatikbasierten Rekonstruktion auswirken, wird innerhalb des Abschnitts 7.3.2 diskutiert.

Für die Split-Regel p_2 , die vom Fassadendesign unabhängig ist, wird die bedingte Wahrscheinlichkeit vordefiniert. Um zu erreichen, dass die Ersetzung $W \rightarrow WGW$ an allen Positionen \mathbf{x} auf der Fassade gleich wahrscheinlich ist, wird für $P(\mathbf{x}|p_2)$ eine Gleichverteilung angesetzt. Im Gegensatz dazu wird die bedingte Wahrscheinlichkeit der Instanzierungsregeln p_i ($i = 3, 4, 5, 6$) jeweils individuell aus den Kacheln und Strukturen der beobachteten Fassade ermittelt. Dies geschieht - in Abhängigkeit der x -Koordinate - für jedes Stockwerk getrennt. Für ein beliebiges Stockwerk SW_r ergibt sich die zugehörige Wahrscheinlichkeitsfunktion $P_r(x|p_i)$ zunächst als reine Binärfunktion. Für die Produktionen p_i ($i = 3, 4, 5$) gilt: x -Bereiche, in denen die Kachelfolge des Nachfolgers von p_i vorkommt, erhalten den Funktionswert eins, alle anderen den Wert null. Abbildung 5.9a(oben) zeigt exemplarisch für das zweite Stockwerk der beobachteten Prinzenbau-Fassade die bedingte Wahrscheinlichkeit $P_2(x|p_{4.1})$ der Produktion $p_{4.1}: G \rightarrow g_1$. Die einzelnen Instanzen der Geometrikacheln g_1 sind gelb markiert; die darin enthaltenen Geometrieobjekte sind jeweils durch ein minimal umschließendes Rechteck vereinfacht wiedergegeben; die Wahrscheinlichkeitsfunktion, dargestellt in Rot, ist dem Stockwerk überlagert. Ungenauigkeiten in der horizontalen Ausdehnung der detektierten Kacheln wirken sich unmittelbar auf den Funktionsverlauf aus. Um die Wahrscheinlichkeitsfunktion davon unabhängig zu machen, werden alle Bereiche $[x_l, x_m]$, für die gilt $P_r(x_j|p_i) = 1$ mit $x_l \leq x_j \leq x_m$, über eine Dilatation verbreitert (Abbildung 5.9a(Mitte)). Des Weiteren werden Positionsungenauigkeiten, die sich an den Bereichsgrenzen x_l und x_m als maximale Wahrscheinlichkeitsänderung auswirken, durch eine Gaußfilterung modelliert (Abbildung 5.9a(unten)). Die Parameter der Gaußkurve und der Dilatation orientieren sich an der horizontalen Ausdehnung der Nachfolgerelemente. Abbildung 5.9b zeigt für das Beispiel aus Abbildung 5.9a(unten) die flächenhafte Darstellung der bedingten Wahrscheinlichkeit $P(\mathbf{x}|p_{4.1})$ bei Betrachtung

aller Stockwerke. Zwei weitere Beispiele bedingter Wahrscheinlichkeiten sind in den Abbildungen 5.9c und d für die Produktion $p_{5,2} : W \rightarrow w_2$ und $p_{3,2} : G \rightarrow S_2$ gegeben.

Für Produktionen des Typs p_6 erreicht die bedingte Wahrscheinlichkeit ihr Maximum an den erkannten vertikalen Symmetrieachsen. Im Beispiel der Prinzenbau-Fassade konnte lediglich für die beiden oberen Stockwerke Symmetrie festgestellt werden (Abbildung 5.9e).

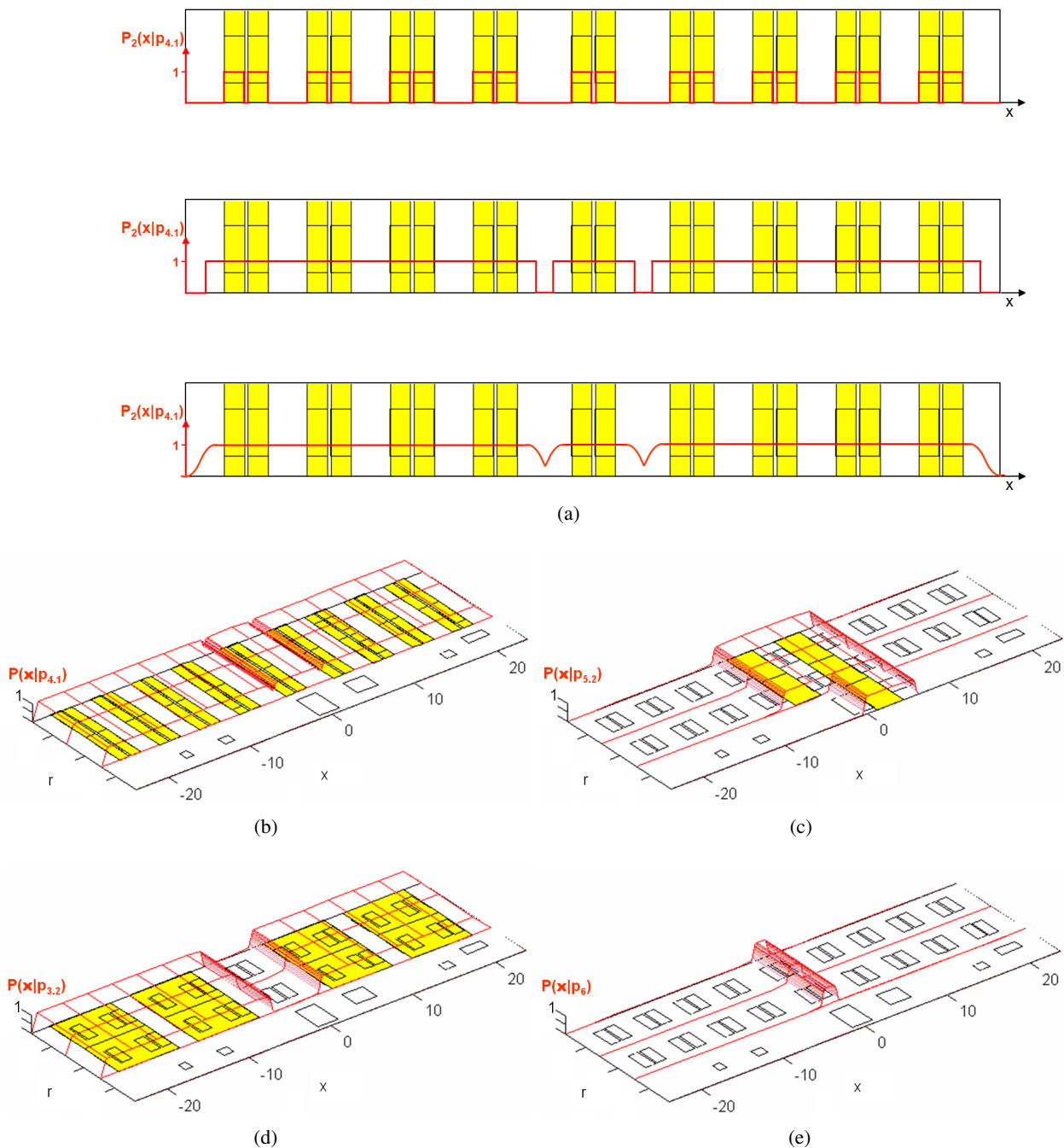


Abbildung 5.9: Bedingte Wahrscheinlichkeiten einiger Beispiel-Produktionen der Prinzenbau-Fassade (Instanzen der jeweiligen Nachfolgerelemente gelb markiert): für ein einzelnes Stockwerk als eindimensionale Funktion im dreistufigen Ableitungsprozess (a); für die gesamte Fassade als flächenhafte Darstellung (b,c,d,e).

6 Modellbasierte Fassadenrekonstruktion

Nach der automatischen Ableitung von Modellwissen aus datengetrieben rekonstruierten Fassadenmodellen (Kapitel 4) liegen Fassadengrammatiken vor, deren individuelle Terminal- und Regelmengen die für das jeweils beobachtete Gebäude typischen Fassadenstrukturen repräsentieren. Durch das Anwenden der Produktionsregeln einer Fassadengrammatik lassen sich nun für gegebene planare Gebäudeflächen Hypothesen für mögliche Fassaden-Designs generieren. Dies geschieht innerhalb eines Produktionsprozesses, an dessen Ende eine Abfolge von Fassadensegmenten, Kacheln genannt, steht. Dieses Kachelgefüge füllt das gegebene Fassadenpolygon nicht automatisch exakt aus, so dass eine geometrische Einpassung der Kacheln in die Fassadenbegrenzungen notwendig wird. Einzelheiten des Produktionsprozesses und der geometrischen Optimierung sind in den Abschnitten 6.1 und 6.2 geschildert. Die nachfolgenden Abschnitte stellen unterschiedliche Anwendungsszenarien der Fassadengrammatiken vor. Von besonderer Bedeutung ist hierbei die Bereitstellung realistischer Fassadenstrukturen selbst in solchen Bereichen, in denen ungenaue oder lückenhafte Sensordaten eine sichere datengetriebene Rekonstruktion verhindern. Die Vervollständigung entsprechender Fassaden mit Strukturen, die sich ohne Stilbruch in das Gesamtbild der Fassade einfügen, ist Gegenstand des Abschnitts 6.3. Die grammatikgestützte Verifikation von unmittelbar aus Sensordaten extrahierten Fassadengeometrien wird in Abschnitt 6.4 behandelt.

6.1 Produktion

Der Produktionsprozess, an dessen Ende synthetisierte Kachelsequenzen stehen, startet mit einer beliebigen Fassade, dem Axiom, und läuft nach folgendem Schema ab:

1. Selektiere ein Nichtterminal der aktuellen Kachelfolge.
2. Wähle eine Produktionsregel, für die gilt: der Vorgänger entspricht dem selektierten Nichtterminal; ein eventuell definierter Kontext des Vorgängers stimmt mit dem Kontext des Nichtterminals überein; die Bedingungsbedingungen sind erfüllt.
3. Ersetze das Nichtterminal durch den Nachfolger der Produktionsregel.
4. Beende den Produktionsprozess, falls bereits alle Nichtterminale substituiert sind; andernfalls fahre mit Schritt 1 fort.

Bei den Schritten 3 und 4 handelt es sich um triviale Anweisungen, die keiner weiteren Erklärung bedürfen. Die Nichtterminal- und die Regel-Selektion der Schritte 1 und 2 werden in den Abschnitten 6.1.1 und 6.1.2 erläutert.

6.1.1 Nichtterminal-Selektion

Das Prinzip, anhand dessen die Nichtterminale zur Substitution ausgewählt werden, bestimmt den Ablauf, nach dem die zu modellierende leere Fassade mit Kacheln besetzt wird. Die als erstes durchgeführte Unterteilung in Stockwerke ist als Folge der zeilenweisen Fassadeninterpretation innerhalb der Grammatikableitung fest vorgegeben. Dagegen sind beim Auffüllen der einzelnen Stockwerke mit Kacheln verschiedene Vorgehensweisen denkbar, die jeweils zu unterschiedlichen Ergebnissen führen können. Möglich ist zum Beispiel, die Kacheln nacheinander von links nach rechts im Stockwerk zu platzieren. Eine andere Strategie schenkt dem Zentrum der Fassade größere Bedeutung, indem zunächst die Stockwerksmitte belegt wird, um anschließend in die noch freien Bereiche jeweils

von links nach rechts Kacheln einzufügen. Diese Methode garantiert, dass selbst größere Kacheln oder Strukturen, die ausschließlich in der Fassadenmitte beobachtet wurden, im zu modellierenden Stockwerk noch genügend Platz haben, um dort eingefügt zu werden. Da die Fassadenmitte häufig das Erscheinungsbild einer Fassade prägt, wird in dieser Arbeit der zweite Ansatz bevorzugt. Umgesetzt wird er durch die methodisch festgelegte Reihenfolge der Nichtterminal-Selektion. Abbildung 6.1a verdeutlicht das Schema anhand einer sukzessive wachsenden Kachelfolge. Die geometrische Interpretation dieser Zeichenkette ist in Abbildung 6.1b gegeben. Aus Gründen der Einfachheit wird hier eine Fassade betrachtet, die lediglich aus einem Stockwerk besteht. In den einzelnen Schritten ist jeweils das für die Substitution ausgewählte Nichtterminal-Symbol rot markiert (Abbildung 6.1a). Während die Reihenfolge, in der die Nichtterminale selektiert werden, systematisch und bei allen Produktionsprozessen gleich ist, sind die angewandten Regeln beispielhafter Natur. Sie entstammen einer einfachen Beispielgrammatik $G^{\text{Fassade}}(V, T, P, F)$ mit $V = \{W, G\}$, $T = \{w_1, g_1, g_2\}$ und $P = \{F \rightarrow W^*, W \rightarrow WGW, W \rightarrow w_1, G \rightarrow g_1, G \rightarrow g_2\}$. Falls für die Substitution eines Nichtterminals mehrere Produktionen in Frage kommen, entscheidet ein Wahrscheinlichkeitswert, der in Abschnitt 6.1.2 diskutiert wird.

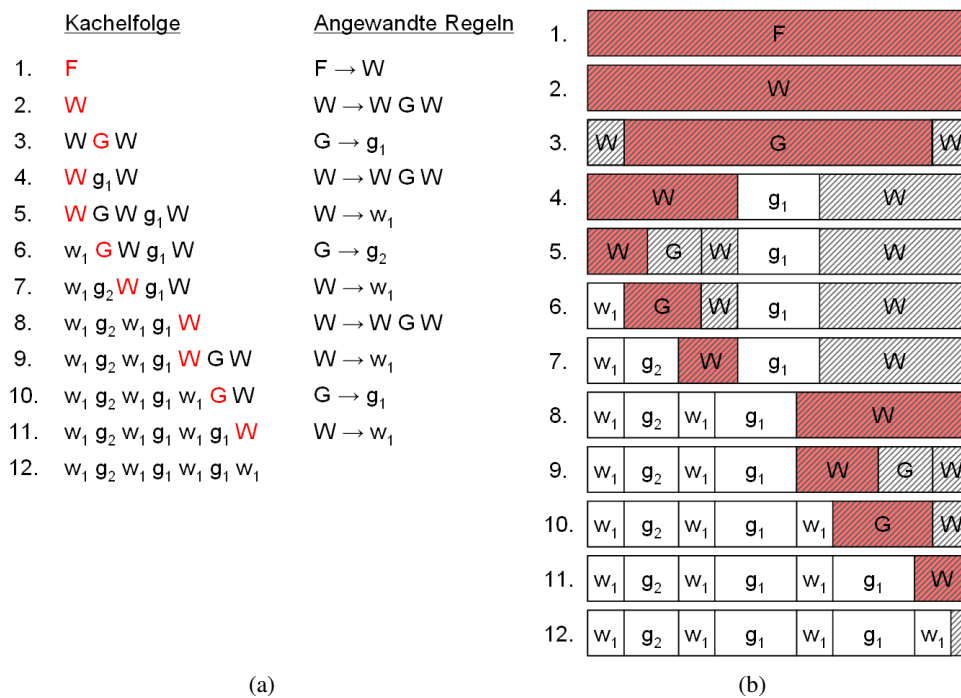


Abbildung 6.1: Nichtterminal-Selektion.

Der Produktionsprozess startet mit dem Axiom F , dem leeren Fassadenpolygon (Abbildung 6.1a, Zeile 1). Solange die Kachelsequenz aus nur einem Symbol besteht, ist die Nichtterminal-Selektion trivial. Der beschriebenen Einfügestrategie folgend, wird, sobald zum ersten Mal die Teilfolge WGW erscheint, zunächst das in der Mitte stehende Nichtterminal G substituiert (Abbildung 6.1a, Zeile 3). Dies erzwingt die Anwendung einer Instanziierungsregel, deren geometrisch definierten Nachfolgerelemente entsprechend in der Mitte des Stockwerks platziert werden. Alle weiteren Ersetzungen werden durchgehend von links nach rechts vorgenommen.

Das jeweils selektierte Nichtterminal definiert eine Region auf der Fassade, in die der Nachfolger einer Produktion eingefügt wird. Es handelt sich dabei um einen sogenannten *aktiven Fassadenbereich*, der speziell für die aktuell durchzuführende Produktionsanwendung zur Verfügung steht, das heißt „aktiv“ ist. In Abbildung 6.1b ist der aktive Fassadenbereich jedes Schrittes rot eingefärbt. Er ist Teil der schraffiert dargestellten Fassadenabschnitte, die durch nichtterminale Platzhalter für zukünftige Ersetzungen freigehalten werden. Weiße Flächen sind bereits mit Terminalkacheln belegt. Wie in Abschnitt 5.3.2 erwähnt, kann die Breite des aktiven Fassadenbereichs über das Anfragemodul $?BEREICH$ ermittelt werden. Für das Nichtterminal $K_i \in V$, welches das i .te Element der aktuellen Kachelfolge $\kappa = (\mathcal{K}_1, \dots, \mathcal{K}_n)$ mit $\mathcal{K}_j \in (T \cup V)$ für $j \in \{1, \dots, n\}$ ist, berechnet sie sich folgendermaßen:

$$\text{Breite}(\text{BEREICH}_{K_i}) = x_i^{\text{rechts}} - x_i^{\text{links}} \quad (6.1)$$

mit

$$x_i^{\text{links}} = x_F^{\text{links}} + \sum_{j=1}^{i-1} \text{Breite}(\mathcal{K}_j) \quad (6.2)$$

$$x_i^{\text{rechts}} = \begin{cases} -\frac{1}{2}\text{Breite}(k_m) - \sum_{j=i+1}^{m-1} \text{Breite}(\mathcal{K}_j) & \text{falls } \exists k_m \in T \text{ mit } i < m \leq n \\ x_F^{\text{rechts}} - \sum_{j=i+1}^n \text{Breite}(\mathcal{K}_j) & \text{sonst} \end{cases} \quad (6.3)$$

$$\text{Breite}(\mathcal{K}_j) = \begin{cases} \text{Breite}(k_j) & \text{falls } \mathcal{K}_j \in T \\ \min_{i=1, \dots, n_w} (\text{Breite}(w_i)) & \text{falls } \mathcal{K}_j = W \\ \min_{i=1, \dots, n_g} (\text{Breite}(g_i)) & \text{falls } \mathcal{K}_j = G \end{cases} \quad (6.4)$$

Die vertikalen Begrenzungen des aktiven Fassadenbereichs x_i^{links} und x_i^{rechts} beziehen sich ebenso wie die linke und rechte Grenze des gesamten Fassadenpolygons x_F^{links} und x_F^{rechts} auf das in Abschnitt 4.1.1 definierte lokale Fassadenkoordinatensystem. x_i^{links} ergibt sich aus der Addition der Breiten aller links von K_i stehenden Kacheln zur x-Position des linken Fassadenrands (Formel (6.2)). Analog erhält man x_i^{rechts} , indem von einer rechts von K_i gelegenen Bezugskante die Breiten aller dazwischenliegenden Kacheln subtrahiert werden (Formel (6.3)). In die Definition dieser Bezugskante fließt dabei die beschriebene Vorgehensweise bei der Nichtterminal-Selektion ein. Wurde bereits eine Terminalkachel k_m in der Mitte des Stockwerks platziert und befindet sich K_i links davon, so dass $i < m$, entspricht die Bezugskante der linken Kante von k_m . Andernfalls ist sie durch die x-Position der rechten Fassadengrenze gegeben. Welche Werte für die Breiten der einzelnen Kacheln gesetzt werden, hängt davon ab, ob es sich um ein Terminal oder ein Nichtterminal handelt (Formel (6.4)). Bei einem Terminal (\mathcal{K}_j lässt sich dann auch als k_j schreiben) kann direkt auf dessen bereits bei der Terminalableitung (Abschnitt 5.1) bestimmte Breite zugegriffen werden. Im Fall eines Nichtterminals W oder G mit noch undefinierter horizontaler Ausdehnung wird die minimale Breite aller terminalen Wand- beziehungsweise Geometrie-kacheln angenommen. Dadurch erreicht der aktive Fassadenbereich maximale Größe und ermöglicht so auch das Einfügen von breiten Kacheln oder Strukturen.

Der Produktionsprozess legt nur die Topologie der Kacheln fest. Ihre endgültige absolute Position auf der Fassade ist das Ergebnis eines geometrischen Einpassungsprozesses (Abschnitt 6.2).

6.1.2 Regel-Selektion

Sind für die Substitution eines Nichtterminals mehrere Regeln anwendbar, entscheidet ein Wahrscheinlichkeitswert darüber, welche Regel ausgewählt wird. Gesucht ist die Produktion p_j , für die die Wahrscheinlichkeit an der aktuellen Position \mathbf{x} auf der Fassade maximal ist. Die dabei zu lösende Optimierungsaufgabe lautet

$$p_j = \arg \max_{1 \leq i \leq n_p} \{P(p_i|\mathbf{x})\}, \quad (6.5)$$

wobei n_p die Anzahl der möglichen Produktionen ist. Die Berechnung der in Formel (6.5) auftretenden bedingten Wahrscheinlichkeiten $P(p_i|\mathbf{x})$ basiert auf der Grundidee des Bayes' schen Ansatzes. Dieser erlaubt es, zusätzlich zu der statistischen Bewertung des vorliegenden Datenmaterials, hier der beobachteten Fassade, auch ergänzende Wissensquellen oder subjektive Erfahrungen miteinzubeziehen. Dadurch lassen sich insbesondere solche Aussagen stützen, die auf der Basis einer nur kleinen Stichprobe formuliert wurden. Der Satz von Bayes, auch Bayes-Theorem genannt, definiert den Zusammenhang (Papoulis, 1965)

$$P(A_i|B) = \frac{P(B|A_i)P(A_i)}{P(B)}, \quad i \in \{1, \dots, n\}, P(B) \neq 0. \quad (6.6)$$

A_1, A_2, \dots, A_n stellen dabei Teilmengen einer Ergebnismenge Ω dar; B bezeichnet ein bestimmtes Ereignis von Ω . $P(A_i|B)$ beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass das beobachtete Ereignis B der Teilmenge A_i zuzuordnen oder, anders ausgedrückt, auf den Umstand A_i zurückzuführen ist. $P(A_i)$ steht für die a priori Wahrscheinlichkeit von A_i . Mit ihr werden Vorkenntnisse über A_i modelliert. $P(B|A_i)$ ist die Wahrscheinlichkeit für das Ereignis B unter der Voraussetzung, dass A_i eingetreten ist. Auch als Likelihood-Wahrscheinlichkeit bezeichnet, fasst sie die aus der Analyse des aktuellen Datenmaterials gewonnenen Erkenntnisse in Form eines statistischen Modells zusammen. Mit $P(B)$ ist die a priori Wahrscheinlichkeit des Ereignisses B gegeben. Dadurch dass die a posteriori Wahrscheinlichkeit $P(A_i|B)$ aus der Verknüpfung der genannten Komponenten entsteht, basiert die Aussagesicherheit auf der Grundlage von sowohl a priori Informationen als auch Beobachtungsmaterial.

Überträgt man das Bayes-Theorem auf die bedingte Wahrscheinlichkeit $P(p_i|\mathbf{x})$, ergibt sich

$$P(p_i|\mathbf{x}) = \frac{P(\mathbf{x}|p_i)P(p_i)}{P(\mathbf{x})}, \quad i \in \{1, \dots, n_p\}, P(\mathbf{x}) \neq 0. \quad (6.7)$$

Die Gesamtheit der Produktionen p_i ($i = 1, \dots, n_p$) beschreibt die Menge derjenigen Regeln, die für die Substitution des aktuell ausgewählten Nichtterminals infrage kommen. Sie ist die zu diesem Zeitpunkt gültige Ergebnismenge Ω , auf der die Optimierungsaufgabe (6.5) ausgeführt wird. $P(p_i|\mathbf{x})$ ist die dabei zu bestimmende Wahrscheinlichkeit, dass ein Nichtterminal, welches sich an der Fassadenposition \mathbf{x} befindet, durch die Produktionsregel p_i substituiert wird. Formal setzt sie sich aus den Elementen $P(\mathbf{x}|p_i)$, $P(p_i)$ und $P(\mathbf{x})$ zusammen, die im Folgenden näher erläutert werden.

$P(\mathbf{x}|p_i)$ beschreibt die Wahrscheinlichkeit einer Fassadenposition \mathbf{x} unter der Voraussetzung, dass p_i angewendet wird. Sie entspricht der bedingten Wahrscheinlichkeit, die für eine Produktion p_i während der Grammatikgenerierung automatisch bestimmt wird (Abschnitt 5.3.2). Da sich die Grammatikableitung auf lediglich eine beobachtete Fassade beschränkt, kommt für eine Regel p_i jede Position \mathbf{x} maximal einmal vor. Für ein beliebiges p_i mit $i \in \{1, \dots, n_p\}$ gilt somit $0 \leq P(\mathbf{x}|p_i) \leq 1$. Ein Vergleich absoluter Häufigkeiten verschiedener Produktionsregeln an einer bestimmten Position $\mathbf{x} = (x, r)$ ist somit ohne Weiteres möglich. Auf eine Normierung von $P((x, r)|p_i)$, so dass für die zugehörige Verteilungsfunktion $\sum_r \int_x P((x, r)|p_i) dx = 1$ gilt, wird daher verzichtet. Abgeleitet für die beobachtete Fassade F mit der Breite $x_F^{\text{rechts}} - x_F^{\text{links}}$ und der Stockwerksanzahl s , ist $P(\mathbf{x}|p_i)$ definiert für alle $\mathbf{x} = (x, r)$ mit $x_F^{\text{links}} \leq x \leq x_F^{\text{rechts}}$ und $r \in \{1, \dots, s\}$. Neu zu modellierende Fassaden F_{neu} unterscheiden sich in der Regel in ihrer räumlichen Ausdehnung von der beobachteten Fassade. Um dennoch für eine bestimmte Position bezüglich der neuen Fassade $\mathbf{x}^{\text{neu}} = (x^{\text{neu}}, r^{\text{neu}})$ mit $x_{F_{\text{neu}}}^{\text{links}} \leq x^{\text{neu}} \leq x_{F_{\text{neu}}}^{\text{rechts}}$ und $r^{\text{neu}} \in \{1, \dots, m\}$ die bedingte Wahrscheinlichkeit abgreifen zu können, wird \mathbf{x}^{neu} in den beobachteten Fassadenbereich projiziert. Für die x-Koordinate geschieht dies über die lineare Skalierung

$$x = \frac{x_F^{\text{rechts}} - x_F^{\text{links}}}{x_{F_{\text{neu}}}^{\text{rechts}} - x_{F_{\text{neu}}}^{\text{links}}} \cdot x^{\text{neu}}. \quad (6.8)$$

Die Stockwerkszahl berechnet sich nach folgender Gleichung:

$$r = \begin{cases} 1 & \text{für } r^{\text{neu}} = 1 \\ \text{rand}(\{2, \dots, s-1\}) & \text{für } 2 \leq r^{\text{neu}} < m \\ s & \text{für } r^{\text{neu}} = m \end{cases} \quad (6.9)$$

Die kleinste und die größte Stockwerkszahl $r^{\text{neu}} = 1$ und $r^{\text{neu}} = m$ werden jeweils auf das unterste Stockwerk $r = 1$ beziehungsweise das höchste Stockwerk $r = s$ der beobachteten Fassade abgebildet. Dazwischen liegenden Stockwerken $2 \leq r^{\text{neu}} < m$ wird über die Zufallsfunktion $\text{rand}()$ eine Stockwerkszahl $r \in \{2, \dots, s-1\}$ zugewiesen. Als stochastisches Modell wird dabei eine Gleichverteilung angesetzt.

$P(p_i)$ definiert die a priori Wahrscheinlichkeit der Regel p_i . Mit ihr lassen sich Vorwissen oder Vermutungen über das Auftreten von p_i modellieren. Üblicherweise bedarf es der subjektiven Einschätzung eines erfahrenen Ex-

perten, um eine geeignete a priori Wahrscheinlichkeit festzulegen. Liegen keine derartigen Kenntnisse vor, wird eine nicht-informative a priori Wahrscheinlichkeit angesetzt. Nach dem „Prinzip der Indifferenz“ (Chalmers, 2007) kann dies beispielsweise dadurch erfolgen, dass allen Möglichkeiten - in diesem Fall allen p_i - gleiche Wahrscheinlichkeiten zugeordnet werden. Die a priori Wahrscheinlichkeit geht damit in eine Konstante über, so dass sich die Optimierungsaufgabe (Formel (6.5)) darauf reduziert, die beste Likelihood-Wahrscheinlichkeit zu bestimmen. Gerade bei kleinem Stichprobenumfang kann jedoch die Integration von a priori Wissen notwendig sein, um die aus den wenigen Beobachtungsdaten gewonnenen Erkenntnisse anzureichern (Mock, 1995). Die Wahl der a priori Wahrscheinlichkeit ist dabei einer gewissen Willkür unterworfen. Gerade diese Möglichkeit zur Willkür wird hier genutzt, um gezielt auf das statistische Verhalten der Regel-Selektion einzuwirken. $P(p_i)$ dient dabei als Steuerungsfunktion, die die Regel-Auswahl auf unterschiedliche Art und Weise beeinflussen kann. Je nachdem, welches Ziel mit der grammatikbasierten Fassadenrekonstruktion verfolgt wird, kann $P(p_i)$ so aufgestellt werden, dass die erzeugten Fassadenstrukturen entweder größtmögliche Variabilität aufweisen oder das charakteristische architektonische Erscheinungsbild der beobachteten Fassade weitestgehend unverändert wiedergeben. In dieser Arbeit geht es in erster Linie darum, realistische Fassadenstrukturen auf Gebäudebereiche zu übertragen, für die entweder keine oder qualitativ unzureichende Beobachtungsdaten vorliegen. Angestrebt wird dabei weniger die strukturelle Vielfalt als vielmehr die Beibehaltung des jeweiligen architektonischen Stils. Nichtsdestotrotz kann auf eine veränderte Zielstellung durch einfaches Variieren der Steuerungsfunktion reagiert werden (siehe Abschnitt 7.3.2). Ein zentraler Aspekt der Fassadengrammatik besteht in dem Wissen um die typische Anordnung der einzelnen Fassadenelemente. Kenntnisse über charakteristische Sequenzen von Fassadenobjekten liegen in Form von Strukturregeln (Abschnitt 5.3.1) vor und fließen über deren Anwendung in den Produktionsprozess ein. Die hierarchischen Beziehungen der einzelnen Sequenzen untereinander sind jedoch nicht Teil der Regelmenge, sondern als Hierarchiewerte der jeweiligen Struktur- und Terminalsymbole abgespeichert (Abschnitt 5.2). Sie geben Auskunft über die Bedeutung, die die jeweiligen Fassadensequenzen für das architektonische Erscheinungsbild der beobachteten Fassade haben. Je größer der Hierarchiewert, desto prägnanter die betreffenden Fassadenobjekte beziehungsweise -strukturen. Damit steht Vorwissen zur Verfügung, das über $P(p_i)$ in die Regel-Selektion miteinbezogen werden kann. $P(p_i)$ wird folgendermaßen festgelegt:

$$P(p_i) = \frac{\text{Priorität}(p_i)}{\sum_{i=1}^{n_p} \text{Priorität}(p_i)} \quad (6.10)$$

mit

$$\text{Priorität}(p_i) = \begin{cases} d_1 & \text{falls } p_i \in \{p^{\text{Typ}2}\} \\ \text{Hierarchie}(\mathcal{K}_{p_i}) & \text{falls } p_i \in \{p^{\text{Typ}3}, p^{\text{Typ}4}, p^{\text{Typ}5}\} \\ d_2 & \text{falls } p_i \in \{p^{\text{Typ}6}\} \end{cases} \quad (6.11)$$

$P(p_i)$ ist über eine sogenannte *Prioritätsfunktion* definiert. Sie modelliert die Prioritäten, die bei der Auswahl der einzelnen Produktionsregeln gelten sollen. Dabei sind d_1 und d_2 frei wählbare Konstanten, $\mathcal{K}_{p_i} \in (T \cup V)$ bezeichnet das Nachfolgerelement der Produktion p_i , und $\{p^{\text{Typ}j}\}$ steht für die Menge aller Regeln, die dem Produktionstyp j angehören. Die Prioritätsfunktion orientiert sich maßgeblich an den bei der Strukturableitung (Abschnitt 5.2) bestimmten Hierarchiewerten. Besteht das Nachfolgerelement der Produktionsregel aus einem Terminal- oder einem Struktursymbol, ergibt sich die Priorität direkt aus dessen Hierarchiewert. Dies ist der Fall bei Instanzierungsregeln der Typen 3, 4 und 5. Mit welcher Priorität die vertikale Splitregel (Typ 2) oder eine eventuell festgestellte Symmetrieregeln (Typ 6) anzuwenden ist, wird über die Konstanten d_1 und d_2 festgelegt. Die in dieser Arbeit vorgestellten Rekonstruktionsbeispiele sind mit $d_1 = \max_{1 \leq j \leq n_p} (\text{Hierarchie}(\mathcal{K}_{p_j})) + 1$ und $d_2 = \max_{1 \leq j \leq n_p} (\text{Hierarchie}(\mathcal{K}_{p_j})) + 2$ erzeugt worden. Die besondere Wahl der Konstanten folgt dem Ziel, die zu modellierende Fassade mit möglichst vielen Fassadenelementen zu besetzen und eventuell erkannte Symmetrien zu erhalten: Die Durchführung eines vertikalen Splits wird gegenüber der Anwendung der zuvor genannten Instanzierungsregeln bevorzugt (d_1 ist größer als der maximal auftretende Hierarchiewert); Symmetrien werden mit der größten Priorität behandelt (d_2 ist größer als d_1).

$P(\mathbf{x})$ ist eine marginale Wahrscheinlichkeit, die die Häufigkeit der Positionen \mathbf{x} auf der Fassade beschreibt. Sie ist ebenso wie der Normierungsfaktor der Funktion $P(p_i)$ (Formel (6.10)) für alle p_i ($i = 1, \dots, n_p$) konstant. Beide Komponenten sind folglich für das Ergebnis der Optimierungsaufgabe (Formel (6.5)) nicht entscheidend. Durch Einsetzen der Formeln (6.10) und (6.7) in Formel (6.5) und unter Vernachlässigung der für p_i ($i = 1, \dots, n_p$) konstanten Größen ergibt sich damit für die Optimierungsgleichung

$$p_j = \arg \max_{1 \leq i \leq n_p} \{P(\mathbf{x}|p_i) \cdot \text{Priorität}(p_i)\}. \quad (6.12)$$

6.2 Geometrische Einpassung der Kacheln

Nach beendetem Produktionsprozess füllen die erzeugten Kachelsequenzen üblicherweise die zu modellierende Fassade nicht exakt aus. Wie im Beispiel der Abbildung 6.1b (Zeile 12) bleiben Fassadenbereiche dann unbesetzt, wenn sie zu schmal sind, um noch weiteren Kacheln Platz zu bieten. Dasselbe Phänomen kann beim Einfügen von Stockwerken in das noch leere Fassadenpolygon auftreten. In beiden Fällen entstehen nicht modellierte Fassadenregionen, die als Folge der in Abschnitt 6.1.1 beschriebenen Einfügestrategie am rechten oder oberen Fassadenrand liegen. Des Weiteren kann es vorkommen, dass einzelne Kacheln an genau diesen Stellen über die Fassadenbegrenzung hinausragen. Voraussetzung ist, dass die speziell hierfür eingeführte Puffervariable *puffer* in den Bedingungsgleichungen c_1 bis c_6 der Produktionsregeln kleiner als null gewählt wird (Abschnitt 5.3.1). Als sinnvoll hat sich ein Wert von „ -1 m“ erwiesen. Damit wird ein Fassadenelement auch dann noch eingefügt, wenn es um einen Meter über den vorhandenen Platz hinausragt. Auf diese Weise werden kleinere Überstände toleriert, um so die Anzahl nicht modellierter Fassadenbereiche möglichst klein zu halten.

Das Ziel der geometrischen Einpassung ist es, eventuelle Lücken und Fassadenüberstände zu beseitigen, indem die Kachelanordnung bezüglich ihrer geometrischen Ausdehnung optimal auf die Fassadengröße abgestimmt wird. Um die dazu notwendige Adaptivität an Fassaden beliebiger Breite und Höhe zu gewährleisten, wird die Kachelanordnung als Federmodell interpretiert, das sich durch Ausüben einer Zug- oder Druckkraft der horizontalen und vertikalen Fassadenausdehnung anpasst. Aufbau und Wirkung des Federmodells werden in Abschnitt 6.2.1 erläutert. Abschnitt 6.2.2 befasst sich mit der mathematischen Realisierung.

6.2.1 Interpretation als Federmodell

Das Federmodell einer Kachelanordnung enthält starre unveränderliche Elemente, die durch elastische Komponenten, die Federn, miteinander verbunden sind. Umgesetzt wird dies durch ein Konzept fester und skalierbarer Größen. Dafür wird bei den Abmessungen der Kacheln und Stockwerkshöhen, die im Zuge der Terminalableitung (Abschnitt 5.1) festgestellt werden, zwischen *absoluten* und *relativen* Werten unterschieden. Als absolut und damit unveränderlich gilt das Kachelattribut Geometrieobjekt. Fest ist sowohl dessen Größe als auch die Anordnung der einzelnen 3D-Körper, die das Design des Geometrieobjekts bestimmen. Die dadurch beschriebenen Fassadenelemente wie Einbuchtungen oder Gebäudevorsprünge stellen somit starre Formen dar, die sich beim Einfügen in neue Fassaden nicht verändern. Konstant ist folglich auch die Breite einer Geometriekachel, die über die horizontale Ausdehnung des zugehörigen Geometrieobjekts definiert ist. Zu den relativen Größen zählen die Höhe eines Stockwerks sowie das Kachelattribut Abstand. Sie sind skalierbar und machen die betreffenden Fassadenkomponenten elastisch. So lassen sich beispielsweise die Stockwerkshöhen stauchen und dehnen. Die Skalierbarkeit des Attributs Abstand bewirkt bei Geometriekacheln, dass die Distanz zwischen Geometrieobjekt und Kachelunterkante in Relation zur Stockwerkshöhe gleich bleibt. Im Falle einer Wandkachel sorgt die Skalierbarkeit für die Elastizität der Kachelbreite, so dass sich die Kachelsequenzen insgesamt auch in horizontaler Richtung der Fassadengröße anpassen können.

Übertragen auf das Federmodell, bilden die Geometrieobjekte nicht verformbare Körper, die durch elastische Fassadenkomponenten untereinander beziehungsweise mit den Fassadenrändern verbunden sind. Das Federmodell wirkt

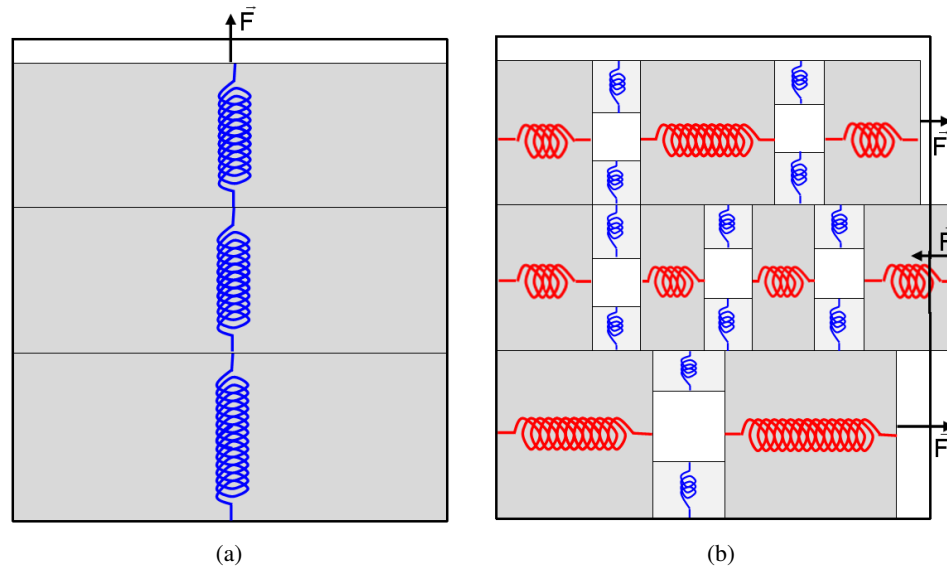


Abbildung 6.2: Federmodell.

in zwei Dimensionen. In vertikaler Richtung sorgen die veränderlichen Stockwerkshöhen sowie das Abstandsattribut der Geometrikacheln für eine optimale Anpassung. In horizontaler Richtung fungieren die Wandkacheln als Federelemente. Abbildung 6.2 veranschaulicht das Federmodell an einem synthetischen Beispiel. Wandkacheln sind dunkelgrau, Geometrikacheln hellgrau eingefärbt. Elastische Fassadenkomponenten sind durch Schraubenfedern symbolisiert. Die Kräfte, die jeweils auf das Federmodell wirken, sind mit Pfeilen gekennzeichnet. Das vertikal wirkende Federmodell verändert die Stockwerkshöhen entsprechend der tatsächlichen Fassadenhöhe (Abbildung 6.2a) und passt die y-Positionen der 3D-Geometrieobjekte an (Abbildung 6.2b: blaue Schraubenfedern). In horizontaler Richtung übertragen die elastischen Wandkacheln die angelegte Kraft auf die Geometrikacheln und führen so zu einer Verschiebung der Geometrieobjekte in x-Richtung (Abbildung 6.2b: rote Schraubenfedern).

Mit dem Federmodell wird die geometrische Einpassung einer Kachelanordnung in das gegebene Fassadenpolygon physikalisch interpretiert. Die Federn selbst werden als idealisierte Hookesche Federn modelliert. Die angelegte Kraft und die dadurch hervorgerufene Längenänderung stehen damit in linearem Zusammenhang. Man spricht auch von einem linear-elastischen Verhalten. Das Hookesche Gesetz lautet

$$F = D \cdot \Delta l, \quad (6.13)$$

wobei F die Kraft, D die Federkonstante und Δl die Längenänderung der Feder beziehungsweise den Federweg bezeichnet.

Das durch die Kachelkonfiguration vorgegebene Federmodell setzt sich als Gesamtsystem aus mehreren kleineren Federmodellen zusammen, die jeweils ein System aus in Reihe geschalteten Federn darstellen. Eine dieser Reihenschaltungen ist durch das vertikal wirkende Federmodell der Stockwerkshöhen gegeben (siehe das Beispiel aus Abbildung 6.2a). Des Weiteren beinhaltet jedes Stockwerk eine Reihenschaltung in horizontaler und jede Geometrikachel eine in vertikaler Richtung (siehe das Beispiel aus Abbildung 6.2b: Ketten aus roten beziehungsweise blauen Schraubenfedern). Generell ist eine Reihenschaltung dadurch charakterisiert, dass jede einzelne Feder die volle äußere Belastung F erfährt. Für ein System aus n in einer Reihe angeordneten Federn ergibt sich also:

$$F = F_i \quad \forall i \in \{1, \dots, n\} \quad (6.14)$$

und damit

$$D_{\text{ges}} \Delta l_{\text{ges}} = D_i \Delta l_i \quad \forall i \in \{1, \dots, n\}. \quad (6.15)$$

F_i ist die Kraft, die auf die i .te Feder wirkt. D_i und Δl_i stellen die Federkonstante und die Auslenkung der i .ten Feder dar; D_{ges} und Δl_{ges} beschreiben die entsprechenden Größen einer Ersatzfeder für das gesamte System. Dabei gilt der Zusammenhang $\Delta l_{\text{ges}} = \sum_{i=1}^n \Delta l_i$, aus dem sich durch Einsetzen des Hookeschen Gesetzes (Formel (6.13)) die Gleichung $\frac{1}{D_{\text{ges}}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{D_i}$ ableiten lässt.

Das in Abbildung 6.2 verwendete Symbol der Schraubenfeder soll die elastische Verformbarkeit der betreffenden Fassadenkomponenten veranschaulichen. Da eine Schraubenfeder im Allgemeinen auch Querbelastungen übertragen kann, ist das Symbol jedoch besser als elastischer Stab beziehungsweise Stabfeder zu interpretieren. Bei rein elastischer Beanspruchung des Federmaterials lässt sich die Federkonstante einer solchen Stabfeder folgendermaßen beschreiben:

$$D = \frac{E \cdot A}{l}. \quad (6.16)$$

Dabei ist A die Querschnittsfläche und l die Länge des Stabes. Der Elastizitätsmodul E stellt eine Werkstoffkonstante dar und charakterisiert das Spannungs-Dehnungs-Verhalten des Stabmaterials. Durch Einsetzen der Formel (6.16) in Formel (6.15) ergibt sich damit für eine Reihenschaltung aus Stabfedern

$$\frac{E_{\text{ges}} A_{\text{ges}} \Delta l_{\text{ges}}}{l_{\text{ges}}} = \frac{E_i A_i \Delta l_i}{l_i}. \quad (6.17)$$

Bei den Reihenschaltungen, die innerhalb einer Kachelkonfiguration auftreten können (siehe das Beispiel aus Abbildung 6.2), sind jeweils sowohl die Werkstoffeigenschaften der elastischen Elemente als auch deren Querschnittsflächen konstant. Mit den Bedingungen $E_{\text{ges}} = E_i = \text{const}$ und $A_{\text{ges}} = A_i = \text{const} \forall i \in \{1, \dots, n\}$ folgt somit aus Formel (6.17) der proportionale Zusammenhang

$$\Delta l_i = \frac{l_i}{l_{\text{ges}}} \Delta l_{\text{ges}}. \quad (6.18)$$

Dies bedeutet beispielsweise für die Anpassung der Stockwerkshöhen an die Fassadenhöhe, dass eine insgesamt anzubringende Höhenänderung der Länge Δl_{ges} auf die einzelnen Stockwerke proportional verteilt wird. Das Längenverhältnis der einzelnen Höhen zueinander bleibt also erhalten. Analoges gilt für das Verhältnis der Wandkachelbreiten bei der Anpassung einer Kachelfolge an die Fassadenbreite.

6.2.2 Berechnung durch mathematische Optimierung

Die rechnerische Umsetzung des Federmodells erfolgt innerhalb eines mathematischen Optimierungsprozesses. Dieser beinhaltet zwei Stufen: die Abbildung des Problems auf ein mathematisches Modell und die Lösung des mathematischen Problems. Bei der Modellbildung (Abschnitt 6.2.2.1) wird das Wirken der einzelnen Systemkomponenten in funktionaler und stochastischer Form beschrieben. Die Problemlösung (Abschnitt 6.2.2.2) beinhaltet die eigentliche mathematische Optimierung des aufgestellten Systems unter Berücksichtigung eventueller Nebenbedingungen.

6.2.2.1 Modellbildung

Der erste Schritt der Modellbildung besteht darin, ein System aus Beobachtungen, Unbekannten und festen Größen zu definieren, welches die physikalische Interpretation der Kachelanordnung als Federmodell bestmöglich wiedergibt und gleichzeitig die Integration architektonischer Gestaltungsprinzipien erlaubt. Das Konzept der festen und skalierbaren Größen wird realisiert, indem alle skalierbaren Fassadenkomponenten als veränderliche Beobachtungen interpretiert werden. Dazu gehören die Wandkachelbreiten b_{w_i} ($i = 1, \dots, n_w$), die Abstandsattribute a_{g_i} ($i = 1, \dots, n_g$) der Geometrikacheln sowie die Stockwerkshöhen h_{SW_i} ($i = 1, \dots, n_{SW}$), wobei n_w die Anzahl der Wandkacheln, n_g die Anzahl der Geometrikacheln und n_{SW} die Anzahl der Stockwerke innerhalb der generierten Kachelanordnung angeben. Starre Fassadenelemente gehen als feste Größen in das mathematische System ein.

Dabei ist B_{g_i} die Breite der Geometrikachel g_i , H_{g_i} ist die Höhe des zur Geometrikachel g_i gehörenden Geometrieobjekts. Zur Unterscheidung von den skalierbaren Breiten und Höhen sind sie mit Großbuchstaben bezeichnet. Fest ist außerdem die Ausdehnung der Fassade, ausgedrückt durch die x-Koordinaten der linken und rechten Fassadenbegrenzung x_F^{links} beziehungsweise x_F^{rechts} sowie durch die y-Koordinaten der unteren und oberen Fassadenkante y_F^{unten} und y_F^{oben} . Gesucht sind die Fassadenpositionen der Stockwerksebenen und Geometrieobjekte, die bezüglich des definierten Systems optimal sind. Sie nehmen die Rolle der zu schätzenden Unbekannten innerhalb des Optimierungsprozesses ein. Die Position einer Stockwerksebene SE_i ($\forall i = 1, \dots, n_{SW} - 1$) ist durch deren y-Koordinate y_{SE_i} beschrieben. Ein Geometrieobjekt g_i ($\forall i = 1, \dots, n_g$) wird über die Koordinaten seines in der Fassadenebene liegenden Mittelpunktes x_{g_i}, y_{g_i} lokalisiert. Die Beobachtungen und die Unbekannten lassen sich zusammenfassen im Beobachtungsvektor $\mathbf{I}_{n,1} = [b_{w_1}, b_{w_2}, \dots, a_{g_1}, a_{g_2}, \dots, h_{SW_1}, \dots]'$ mit $n = n_w + n_g + n_{SW}$ und im Unbekanntenvektor $\mathbf{x}_{u,1} = [x_{g_1}, x_{g_2}, \dots, y_{g_1}, y_{g_2}, \dots, y_{SE_1}, \dots]'$ mit $u = 2n_g + n_{SW} - 1$.

Wie im Verlauf dieses Abschnitts noch gezeigt werden wird, lassen sich die Beobachtungen \mathbf{I} als Funktionen der zu schätzenden Unbekannten \mathbf{x} ausdrücken. Als Optimierungsmodell bietet sich demnach das Gauß-Markoff-Modell an. Die Schätzung im Gauß-Markoff-Modell ist auch als *Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen* bekannt. Die Modelldefinition lautet (Koch, 2004):

$$E(\mathbf{I}) := \mathbf{I} + \mathbf{v} = \mathbf{A}\mathbf{x} \quad (6.19)$$

$$D(\mathbf{I}) = \sigma^2 \mathbf{P}^{-1}. \quad (6.20)$$

Darin bezeichnet \mathbf{I} den $n \times 1$ Zufallsvektor von Beobachtungen, \mathbf{v} den $n \times 1$ Verbesserungsvektor, \mathbf{x} den $u \times 1$ Vektor unbekannter, fester Größen, \mathbf{A} eine $n \times u$ Koeffizientenmatrix und $D(\mathbf{I})$ die $n \times n$ Kovarianzmatrix der Beobachtungen, ausgedrückt durch die Inverse der Gewichtsmatrix \mathbf{P} und die Varianz der Gewichtseinheit σ^2 . Man spricht von einem Gauß-Markoff-Modell mit vollem Rang, wenn \mathbf{A} vollen Spaltenrang $\text{rg}\mathbf{A} = u$ besitzt und \mathbf{P} positiv definit ist. Formel (6.19) beschreibt mit den Erwartungswerten der Beobachtungen das 1. Zentrale Moment. Die Gleichungen $\mathbf{I} + \mathbf{v} = \mathbf{A}\mathbf{x}$ nennt man auch Beobachtungs- oder Verbesserungsgleichungen. Sie formulieren das funktionale Modell des Ausgleichungssystems. Formel (6.20) gibt mit dem 2. Zentralen Moment das stochastische Modell an.

Das in den Formeln (6.19) und (6.20) definierte Ausgleichungsmodell kann um Nebenbedingungen der Form

$$\mathbf{H}\mathbf{x} = \mathbf{w} \quad (6.21)$$

zu dem sogenannten Gauß-Markoff-Modell mit Restriktionen erweitert werden (Koch, 2004). Die unbekannt Parameter \mathbf{x} werden dabei r linearen Bedingungen unterworfen. Beschrieben werden sie durch die $r \times u$ Restriktionsmatrix \mathbf{H} mit $\text{rg}\mathbf{H} = r$ ($r \leq u$) und den $r \times 1$ Widerspruchsvektor \mathbf{w} . Wenn sich die Bedingungen als Beobachtungen auffassen lassen, kann das Gauß-Markoff-Modell mit Restriktionen in das Gauß-Markoff-Modell ohne Restriktionen überführt werden (Koch, 2004). Die Bedingungen werden dabei als Pseudobeobachtungen mit sehr kleinen Varianzen interpretiert und in Form von Verbesserungsgleichungen in das Ausgleichungsmodell (Formeln (6.19) und (6.20)) aufgenommen. Durch die kleinen Varianzen werden die Pseudobeobachtungen hoch gewichtet und damit nahezu nicht verändert, ihre Verbesserungen sind quasi null. Die Formulierung von Nebenbedingungen ist nicht auf Restriktionsgleichungen in der Art der Formel (6.21) beschränkt. Auch Ungleichungsrestriktionen der Form

$$\mathbf{H}\mathbf{x} \leq \mathbf{w} \quad (6.22)$$

können in die Ausgleichung integriert werden.

Im Folgenden werden die in den Optimierungsprozess der Fassadengeometrie eingehenden Beobachtungsgleichungen, Bedingungsgleichungen und Bedingungsungleichungen aufgeführt. Die Beobachtungsgleichungen stellen den funktionalen Zusammenhang zwischen beobachteten, unbekannt und festen Größen dar. Sie beschreiben die Konfiguration beziehungsweise die Topologie der betreffenden Fassadenelemente. Mit Hilfe der Restriktionsglei-

chungen und -ungleichungen lassen sich semantische Informationen integrieren. Zum Beispiel kann so die Einhaltung grundlegender architektonischer Gestaltungsprinzipien erzwungen werden.

Beobachtungsgleichungen: Jede Beobachtungsart lässt sich in einen eigenen Typ von Beobachtungsgleichungen überführen. So bilden die beobachteten Wandkachelbreiten b_{w_i} ($i = 1, \dots, n_w$) Verbesserungsgleichungen der Form

$$b_{w_i} + v_{b_i} = \begin{cases} x_{g_{\text{rechts}}} - \frac{1}{2}B_{g_{\text{rechts}}} - (x_{g_{\text{links}}} + \frac{1}{2}B_{g_{\text{links}}}) & \text{falls } \exists g_{\text{links}} \wedge \exists g_{\text{rechts}} \\ x_{g_{\text{rechts}}} - \frac{1}{2}B_{g_{\text{rechts}}} - x_F^{\text{links}} & \text{falls } \nexists g_{\text{links}} \wedge \exists g_{\text{rechts}} \\ x_F^{\text{rechts}} - (x_{g_{\text{links}}} + \frac{1}{2}B_{g_{\text{links}}}) & \text{falls } \exists g_{\text{links}} \wedge \nexists g_{\text{rechts}} \\ x_F^{\text{rechts}} - x_F^{\text{links}} & \text{falls } \nexists g_{\text{links}} \wedge \nexists g_{\text{rechts}} \end{cases}. \quad (6.23)$$

Die Breite b_{w_i} der Wandkachel w_i ergibt sich aus dem Abstand ihrer vertikalen Begrenzungen. Eine solche Begrenzung ist entweder durch eine benachbarte Geometrikachel g_{links} oder g_{rechts} definiert und damit aus deren x-Position und Breite berechenbar oder, falls die Wandkachel am Fassadenrand liegt, durch die x-Koordinate der betreffenden Fassadenseite x_F^{links} beziehungsweise x_F^{rechts} gegeben. Der funktionale Zusammenhang für das Abstandsattribut einer Geometrikachel lautet

$$a_{g_i} + v_{a_i} = \left(y_{g_i} - \frac{1}{2}H_{g_i} - y_{SE_{\text{unten}}} \right) / (y_{SE_{\text{oben}}} - y_{SE_{\text{unten}}}). \quad (6.24)$$

Das in Relation zur Stockwerkshöhe bestimmte Abstandsattribut a_{g_i} der Geometrikachel g_i ($i \in \{1, \dots, n_g\}$) leitet sich aus der y-Position und Höhe des zugehörigen Geometrieobjekts sowie den y-Koordinaten der die Geometrikachel begrenzenden Stockwerksebenen $y_{SE_{\text{unten}}}$ und $y_{SE_{\text{oben}}}$ ab. Dabei ist $y_{SE_{\text{oben}}} = y_F^{\text{oben}}$, falls g_i im obersten Stockwerk liegt, und $y_{SE_{\text{unten}}} = y_F^{\text{unten}}$, falls g_i im untersten Stockwerk liegt. Für die beobachteten Stockwerkshöhen h_{SW_i} ($i = 1, \dots, n_{SW}$) können Verbesserungsgleichungen des Typs

$$h_{SW_i} + v_{h_i} = y_{SE_{\text{oben}}} - y_{SE_{\text{unten}}} \quad (6.25)$$

formuliert werden mit $y_{SE_{\text{oben}}} = y_F^{\text{oben}}$, falls SW_i das oberste Stockwerk, und $y_{SE_{\text{unten}}} = y_F^{\text{unten}}$, falls SW_i das unterste Stockwerk darstellt.

Jede Beobachtung repräsentiert in der physikalischen Modellvorstellung eine von mehreren in Reihe geschalteten Federn (Abschnitt 6.2.1). Das in Formel (6.18) dargestellte spezielle Stauchungs- oder Dehnungsverhalten einer solchen Feder fließt als stochastische Information der Beobachtung in die Ausgleichung ein. Damit ergeben sich für die beobachteten Wandkachelbreiten b_{w_i} ($i = 1, \dots, n_w$) die Gewichte $p_{b_i} = \frac{1}{b_{w_i}}$ und für die Stockwerkshöhen h_{SW_i} ($i = 1, \dots, n_{SW}$) analog $p_{h_i} = \frac{1}{h_{SW_i}}$. Die relativ zur Stockwerkshöhe angegebenen Geometrikachelabstände a_{g_i} ($i = 1, \dots, n_g$) erhalten die Gewichte $p_{a_i} = \frac{1}{a_{g_i} h_{SW_i}}$, wobei hier SW_i das Stockwerk ist, in dem sich g_i befindet. Korrelationen zwischen den einzelnen Beobachtungen sind nicht bekannt. Die Nebendiagonalelemente der Gewichtsmatrix \mathbf{P} werden folglich gleich null gesetzt.

Bedingungsgleichungen: Um architektonischen Grundprinzipien gerecht zu werden, können Bedingungen an die unbekanntes Größen der Ausgleichung formuliert werden. Auf diese Weise lassen sich die Positionen von Geometrieobjekten absolut oder relativ zueinander beeinflussen. Hier werden Bedingungen dazu genutzt, ungefähr übereinander angeordnete Geometrieobjekte so zu verschieben, dass sie exakt in einer Spalte liegen. Vertikale Fassadengliederungen, wie sie in der Realität häufig auftreten (Abschnitt 2.1, Abbildung 2.1b), werden auf diese Weise betont. Für jedes Paar von Geometrieobjekten g_j und g_k , deren x-Positionen auf der Fassade identisch sein sollen, wird eine Pseudobeobachtung $dx_{jk} = 0$ mit hohem Gewicht eingeführt. Die zugehörige Beobachtungsgleichung heißt

$$dx_{jk} + v_{dx_{jk}} = x_{g_k} - x_{g_j}. \quad (6.26)$$

Analog sorgt die hoch gewichtete Pseudobeobachtung $dy_{jk} = 0$ dafür, dass zwei Geometrieobjekte g_j und g_k , die sich im gleichen Stockwerk befinden, dieselbe y-Position auf der Fassade erhalten. Über Beobachtungsgleichungen der Form

$$dy_{jk} + v_{dy_{jk}} = y_{g_k} - y_{g_j} \quad (6.27)$$

wird so eine exakte zeilenweise Anordnung von Geometrieobjekten realisiert.

Bedingungsungleichungen: Bedingungsungleichungen sind weniger restriktiv als Bedingungsgleichungen. Sie lassen sich beispielsweise nutzen, um geometrische Relationen zwischen Fassadenkomponenten zu definieren. Im Speziellen werden sie hier so formuliert, dass realistische Abstände zwischen benachbarten Geometrieobjekten oder zwischen Geometrieobjekt und Fassadenrand im Zuge der Ausgleichung nicht unterschritten werden können. Eine Festlegung von Mindestabständen ist dann sinnvoll, wenn einzelne Geometrieobjekte schon vor der Ausgleichung sehr dicht beieinander oder nahe am Fassadenrand liegen. Dies ist sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung denkbar. Um jedoch die Abbildungsmöglichkeiten der architektonischen Gestaltung nicht zu stark einzuschränken, werden entsprechende Mindestgrößen lediglich für horizontale Abstände festgelegt. Die Motivation hierfür entspringt der Tatsache, dass Fenster, die zu einem Raum gehören, oftmals eng aneinander gereiht sind und folglich entsprechende Restriktionen notwendig machen. Aus diesem Grund wird für jede Wandkachel, die an mindestens eine Geometrikachel stößt, gefordert, dass sie breiter als ein bestimmtes Mindestmaß sein muss. Umgeformt im Sinne der Formel (6.22) lautet die entsprechende Ungleichung:

$$\begin{aligned} -x_{g_{\text{rechts}}} + x_{g_{\text{links}}} &\leq -\text{mindist} - \frac{1}{2}B_{g_{\text{rechts}}} - \frac{1}{2}B_{g_{\text{links}}} && \text{falls } \exists g_{\text{links}} \wedge \exists g_{\text{rechts}} \\ -x_{g_{\text{rechts}}} + x_F^{\text{links}} &\leq -\text{mindist} - \frac{1}{2}B_{g_{\text{rechts}}} && \text{falls } \nexists g_{\text{links}} \wedge \exists g_{\text{rechts}} \\ -x_F^{\text{rechts}} + x_{g_{\text{links}}} &\leq -\text{mindist} - \frac{1}{2}B_{g_{\text{links}}} && \text{falls } \exists g_{\text{links}} \wedge \nexists g_{\text{rechts}} \end{aligned} \quad (6.28)$$

Bei den in dieser Arbeit vorgestellten Beispielen wurde der Mindestabstand $\text{mindist} = 5 \text{ cm}$ gewählt.

Sowohl das funktionale als auch das stochastische Modell lassen sich vollautomatisch aufstellen. Art und Anzahl von Verbesserungsgleichungen der Form (6.23), (6.24) oder (6.25) sind durch die elastischen Fassadenkomponenten, die Beobachtungen, vorgegeben. So wird für jedes Element des Beobachtungsvektors \mathbf{l} die jeweils passende Verbesserungsgleichung mit entsprechender Gewichtung eingeführt. Ebenso trivial ist die Festlegung der Ungleichungsrestriktionen, die standardmäßig für diejenigen Wandkacheln formuliert werden, die eine der in Formel (6.28) genannten Voraussetzungen erfüllen. Im Gegensatz dazu müssen die Elemente, für die eine spalten- oder zeilenweise Ausrichtung vorgenommen werden soll, extra bestimmt werden. Dafür werden die x- beziehungsweise y-Positionen der einzelnen Geometrieobjekte verglichen. Unterscheiden sich die jeweiligen Koordinaten zweier Geometrieobjekte um nicht mehr als einen bestimmten Schwellwert, beispielsweise 0.3 m, wird eine Pseudobeobachtung der Form (6.26) oder (6.27) mit hohem Gewicht in die Ausgleichung eingeführt.

6.2.2.2 Problemlösung

Eine mögliche Methode, die unbekannt Parameter im Gauß-Markoff-Modell zu schätzen, ist die Minimierung der Verbesserungsquadratsumme unter Berücksichtigung des stochastischen Modells. Die Schätzung mit der Zielfunktion $\mathbf{v}'\mathbf{P}\mathbf{v} \rightarrow \min$ heißt *Methode der kleinsten Quadrate*. Übertragen auf das Modell der vermittelnden Ausgleichung ergibt sich damit die quadratische Zielfunktion

$$(\mathbf{Ax} - \mathbf{l})' \mathbf{P} (\mathbf{Ax} - \mathbf{l}) =: \mathbf{v}' \mathbf{P} \mathbf{v} \rightarrow \min. \quad (6.29)$$

Durch Ausmultiplizieren der Zielfunktion erhält man

$$\frac{1}{2}\mathbf{x}'\mathbf{A}'\mathbf{P}\mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{l}'\mathbf{P}\mathbf{A}\mathbf{x} + \frac{1}{2}\mathbf{l}'\mathbf{P}\mathbf{l} \rightarrow \min. \quad (6.30)$$

Sind bei der Ausgleichung Ungleichungsrestriktionen der Form $\mathbf{H}\mathbf{x} \leq \mathbf{w}$ zu berücksichtigen, liegt ein Problem der quadratischen Programmierung vor (Koch, 2004). Die allgemeine Definition eines quadratischen Programms ist die Minimierung einer quadratischen Zielfunktion

$$\phi(\mathbf{x}) = \frac{1}{2}\mathbf{x}'\mathbf{Q}\mathbf{x} + \mathbf{c}'\mathbf{x} + \gamma \rightarrow \min \quad (6.31)$$

unter den linearen Nebenbedingungen

$$\mathbf{H}\mathbf{x} \leq \mathbf{w} \quad (6.32)$$

$$\mathbf{x} \geq \mathbf{0}. \quad (6.33)$$

Die Zielfunktion nach der Methode der kleinsten Quadrate im Gauß-Markoff-Modell weist in ihrer ausmultiplizierten Version (Formel (6.30)) genau die geforderte Form der Gleichung (6.31) auf, wobei $\mathbf{Q} = \mathbf{A}'\mathbf{P}\mathbf{A}$, $\mathbf{c} = -\mathbf{A}'\mathbf{P}\mathbf{l}$ und $\gamma = \frac{1}{2}\mathbf{l}'\mathbf{P}\mathbf{l}$. Nach Fritsch (1985) und Schaffrin (1981) ist die Nichtnegativitätsbedingung der Formel (6.33) keine grundsätzliche Voraussetzung und muss nicht in allen Fällen beachtet werden.

Zur Lösung des quadratischen Programms werden die Ungleichungsrestriktionen (Formeln (6.32) und (6.33)) mit Hilfe sogenannter Schlupfvariablen $\mathbf{t} = [t_1^2, t_2^2, \dots, t_r^2]'$ und $\mathbf{s} = [s_1^2, s_2^2, \dots, s_u^2]'$ in die Gleichungsrestriktionen

$$\mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{t} = \mathbf{w} \quad (6.34)$$

$$-\mathbf{x} + \mathbf{s} = \mathbf{0} \quad (6.35)$$

überführt. Die Auflösung der Zielfunktion (6.31) unter Berücksichtigung der Bedingungen (6.34) und (6.35) basiert auf der Minimierung der Lagrange-Funktion $L(\mathbf{x}, \mathbf{t}, \mathbf{s}, \mathbf{v}, \boldsymbol{\mu}) := \frac{1}{2}\mathbf{x}'\mathbf{Q}\mathbf{x} + \mathbf{c}'\mathbf{x} + \gamma + \mathbf{v}'(\mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{t} - \mathbf{w}) + \boldsymbol{\mu}'(-\mathbf{x} + \mathbf{s})$, wobei \mathbf{v} und $\boldsymbol{\mu}$ die Vektoren der Lagrange-Multiplikatoren darstellen. Die zu null gesetzten partiellen Ableitungen $\frac{\partial L}{\partial \mathbf{x}}$, $\frac{\partial L}{\partial \mathbf{v}}$, $\frac{\partial L}{\partial \boldsymbol{\mu}}$, $\frac{\partial L}{\partial t_i}$ ($\forall i = 1, \dots, r$) und $\frac{\partial L}{\partial s_i}$ ($\forall i = 1, \dots, u$) heißen Kuhn-Tucker Bedingungen und lassen sich durch geeignete Umformungen (Fritsch, 1985) umschreiben in das Problem:

$$\begin{aligned} &\text{Finde } \mathbf{z}, \boldsymbol{\lambda}, \\ &\text{so dass } \mathbf{z} = \mathbf{M}\boldsymbol{\lambda} + \mathbf{q} \\ &\text{und } \mathbf{z}'\boldsymbol{\lambda} = 0 \end{aligned} \quad (6.36)$$

mit den Substitutionen

$$\mathbf{z} := \begin{bmatrix} \mathbf{t} \\ \mathbf{x} \end{bmatrix}, \boldsymbol{\lambda} := \begin{bmatrix} \mathbf{v} \\ \boldsymbol{\mu} \end{bmatrix}, \mathbf{q} := \begin{bmatrix} \mathbf{H}\mathbf{Q}^{-1}\mathbf{c} + \mathbf{w} \\ -\mathbf{Q}^{-1}\mathbf{c} \end{bmatrix}, \mathbf{M} := \begin{bmatrix} \mathbf{H}\mathbf{Q}^{-1}\mathbf{H}' & -\mathbf{H}\mathbf{Q}^{-1} \\ -\mathbf{Q}^{-1}\mathbf{H}' & \mathbf{Q}^{-1} \end{bmatrix}. \quad (6.37)$$

Die Vektoren \mathbf{z} und $\boldsymbol{\lambda}$ verhalten sich komplementär zueinander. Ist eine Komponente z_i größer als null, muss das komplementäre Element λ_i gleich null sein und umgekehrt. Die in Ausdruck (6.36) formulierte Aufgabenstellung nennt man Lineares Komplementaritätsproblem (*engl.: Linear Complementarity Problem, LCP*). Für die Lösung eines LCP stehen verschiedene Algorithmen zur Verfügung. Umfangreiche Ausführungen hierzu sind in Cottle et al. (1992); Schaffrin (1981); Fritsch (1985) zu finden. Häufig verwendete Methoden stellen beispielsweise der Lemke-Algorithmus (Lemke, 1968) oder der Cottle-Dantzig-Algorithmus (Cottle und Dantzig, 1968) dar. In dieser Arbeit wird eine Matlab-Implementierung verwendet, die auf der in Gill et al. (1991) und Gill et al. (1984) beschriebenen Lösungsstrategie aufbaut.

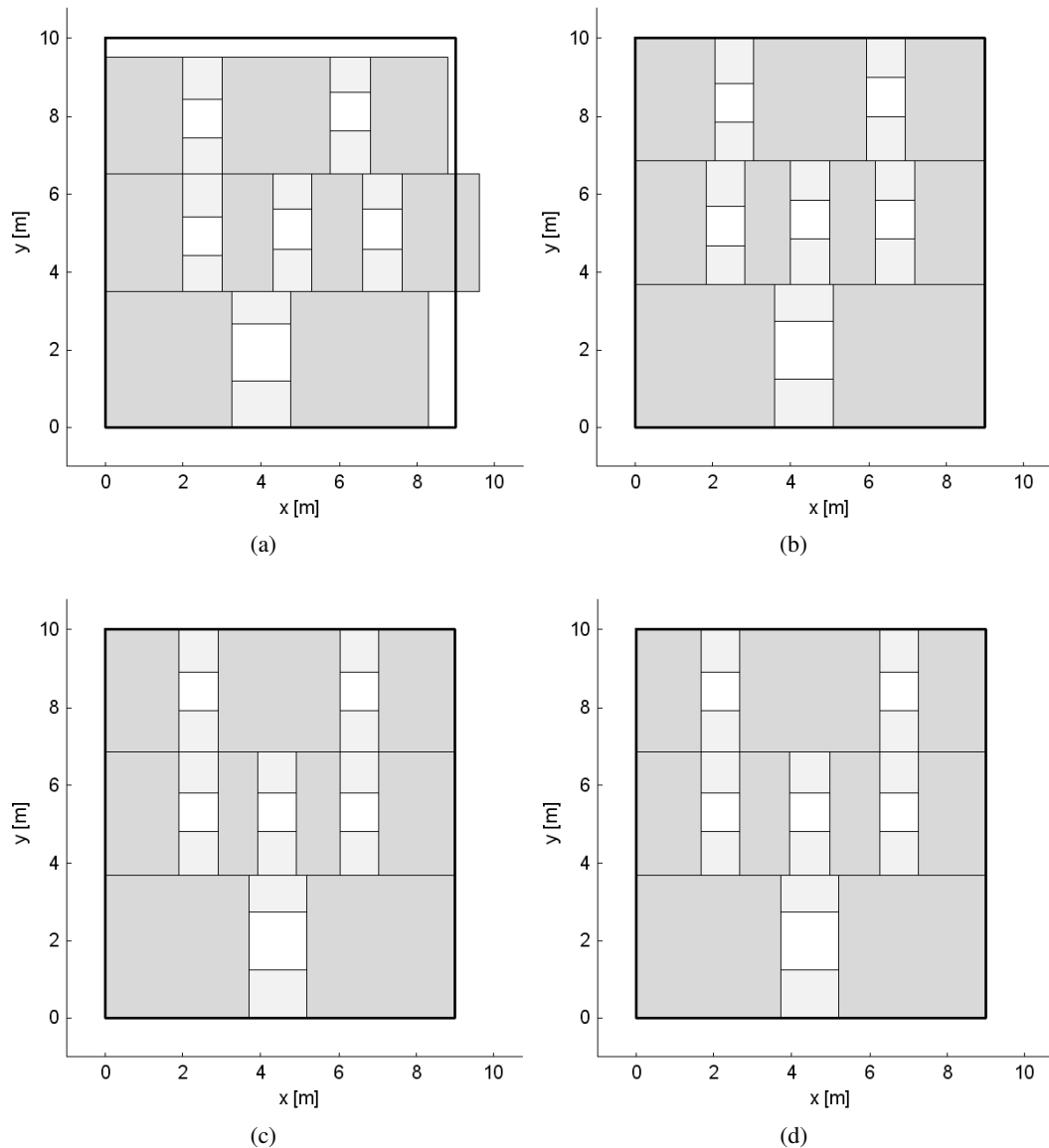


Abbildung 6.3: Geometrische Einpassung einer Kachelanordnung: Kachelanordnung vor der Ausgleichung (a), Ergebnis der Ausgleichung ohne Restriktionen (b), mit Gleichungsrestriktionen (c), mit Gleichungs- und Ungleichungsrestriktionen (d).

Abbildung 6.3 greift das Beispiel von Abbildung 6.2 auf und zeigt das Ergebnis der geometrischen Einpassung. Um die Auswirkung der in Abschnitt 6.2.2.1 eingeführten Gleichungs- und Ungleichungsbedingungen auf die Anordnung der Kacheln zu verdeutlichen, wurde die Fassadengeometrie sowohl mit als auch ohne Bedingungen ausgeglichen. Ausgangspunkt sind die Kachelsequenzen, wie sie durch den Produktionsprozess (Abschnitt 6.1) erzeugt werden (Abbildung 6.3a). Bestehende Fassadenlücken beziehungsweise -überstände werden bereits durch eine Ausgleichung ohne Restriktionen beseitigt (Abbildung 6.3b). Eine semantische Verknüpfung der Fassadenelemente bezüglich einer übergeordneten Fassadengeometrie ist hier noch nicht enthalten, so dass kleinere Versätze zwischen den einzelnen Geometrieobjekten deutlich sichtbar sind. Eine exakte zeilen- und spaltenweise Anordnung wird erst durch die Integration entsprechender Bedingungen erreicht (Abbildung 6.3c). Um den Einfluss der beschriebenen Ungleichungsrestriktionen auf das Ausgleichungsergebnis zu demonstrieren, wurde zusätzlich gefordert (Abbildung 6.3d), dass eine Wandkachel mindestens 1.3m breit sein muss, was der beobachteten Breite der schmalsten Wandkachel entspricht.

6.3 Vervollständigung

Ungünstige Scankonfigurationen oder Sichthindernisse bei der Datenaufnahme können dazu führen, dass einige Fassadenbereiche nicht oder nur durch wenige Laserpunkte erfasst sind. Betroffene Wandbereiche weisen eine reduzierte Punktdichte auf. Ist die Punktdichte zu gering, beträgt also der Punktabstand mehr als ein Viertel des Ausmaßes der zu rekonstruierenden Fassadenelemente (siehe Abschnitt 4.8.2), kann eine zuverlässige Extraktion der betreffenden Strukturen in solchen Bereichen nicht mehr garantiert werden; das Ergebnis der datengetriebenen Rekonstruktion (Kapitel 4) wird fehlerbehaftet. Falsch rekonstruierte Fassadenstrukturen fließen direkt in die daraus abgeleitete Grammatik ein und werden über diese an neu zu modellierende Fassaden weitergegeben. Ziel ist es daher, die Qualität der Grammatik weitestgehend unabhängig von der Punktverteilung auf der Fassade zu machen und gleichzeitig eine zuverlässige Modellierung von nur partiell erfassten Fassaden zu gewährleisten. Als möglicher Lösungsansatz wird im Folgenden ein grammatikbasiertes Vervollständigungsverfahren vorgestellt. Die Grundidee besteht darin, die Fassadengrammatik ausschließlich von solchen Bereichen des datengetrieben erzeugten Modells abzuleiten, in denen genügend dichte Punktdaten und damit zuverlässig extrahierte Fassadenstrukturen vorliegen. Der Anteil falscher Strukturen, die auf die Grammatik Einfluss haben, wird auf diese Weise minimiert. Erzeugt wird eine qualitativ gute Grammatik, durch welche die nur ungenügend erfassten Fassadenbereiche mit realistischen Strukturen vervollständigt werden können.

Bereiche mit geringer Punktdichte können verschiedene Ursachen haben und an unterschiedlichen Fassadenstellen auftreten. Nicht alle Fälle sind auf Abschattungen oder ungünstige Aufnahmekonfigurationen zurückzuführen. Denkbar ist auch, dass es sich um Fensterregionen handelt. Abschnitt 6.3.1 legt fest, welche Gebiete auf der Fassade generell nur für eine Vervollständigung infrage kommen. Davon abhängig ist der Fassadenbereich, auf den die Ableitung der Grammatik beschränkt wird. Er wird nach einem heuristischen Verfahren bestimmt, das in Abschnitt 6.3.2 beschrieben ist. Die Vervollständigung selbst stellt einen Synthetisierungsvorgang dar, der im Wesentlichen dem in Abschnitt 6.1 beschriebenen Produktionsprozess folgt und auf den daher nur kurz in Abschnitt 6.3.3 eingegangen wird.

6.3.1 Zielvorgabe der Vervollständigung

Die Vervollständigung soll auf Fassadenbereiche angewendet werden, die sich aufgrund einer schlechten Punktabdeckung nicht für eine datengetriebene Rekonstruktion eignen. Eine variierende Punktdichte auf der Fassade kann verschiedene Ursachen haben. Dazu zählen unter anderem:

1. schräge Blickwinkel auf einzelne Fassadenabschnitte
2. Sichthindernisse
3. spiegelnde oder nicht reflektierende Oberflächen

Nicht immer lassen sich beim Scannen schräge Blickwinkel auf die Fassade vermeiden. Bei langgestreckten Gebäuden sind dabei insbesondere die an den seitlichen Fassadenrändern gelegenen Wandpartien betroffen; bei hohen Gebäuden sind es die oberen Stockwerksbereiche. Ein typisches Beispiel dafür ist die Aufnahme enger Straßenschluchten durch mobiles Laserscanning. Der Abstand zum Objekt ist hier oftmals zu gering, als dass die oberen Stockwerke hoher Gebäude unter einem günstigen Blickwinkel erfasst werden könnten. Sie werden entweder gar nicht oder nur mit großem Punktabstand abgetastet. Abbildung 6.4 zeigt aus unterschiedlichen Perspektiven eine Punktwolke, die für ein 18 m hohes Wohngebäude in Stuttgart mit dem StreetMapper-System aufgenommen wurde. Das Gebäude wurde dabei zweimal vom Streetmapper passiert: einmal von rechts nach links in einem Abstand von ungefähr 8 m und einmal von links nach rechts in einer Entfernung von circa 36 m. Die zurückgelegte Trajektorie ist in Abbildung 6.4a durch einen Pfeil veranschaulicht. Die roten Pfeilabschnitte stellen die Positionen während der Gebäudeaufnahme dar. In Abbildung 6.4b sind die 3D-Fassadenpunkte in Frontalansicht zu sehen. Die unterschiedlichen Farben geben an, von welchem Scanner des StreetMapper-Systems sie erfasst wurden. Die Punkte des oberen Scanners sind gelb dargestellt; die Punkte des in Fahrtrichtung nach links blickenden Scanners sind rot, die des nach rechts ausgerichteten türkis. Insgesamt weist die Punktwolke stark variierende Punktabstände auf. Diese

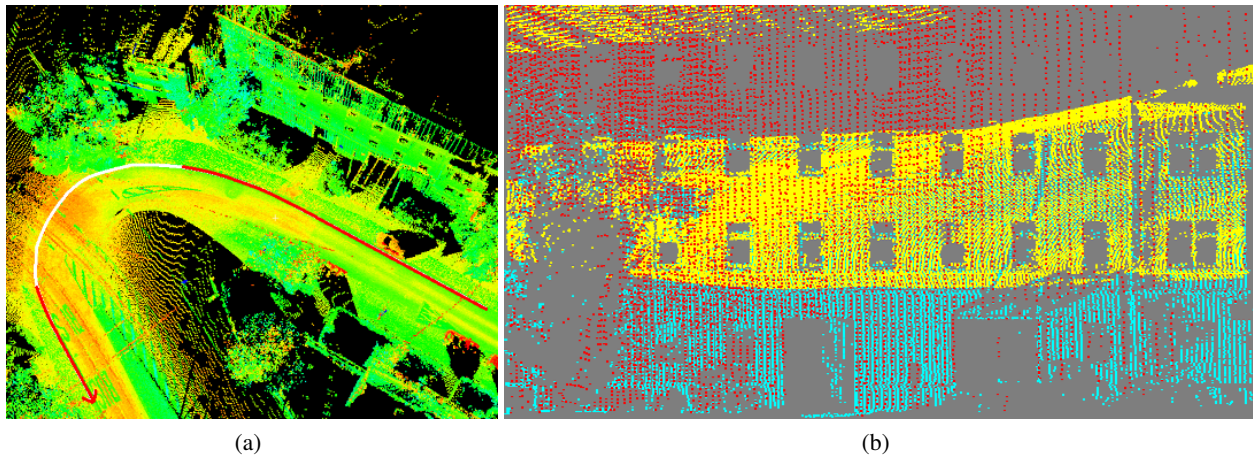


Abbildung 6.4: Durch das StreetMapper-System erfasste Laserpunktwolke eines Wohngebäudes in Vogelperspektive (a) und Frontalansicht (b).

reichen von 0.07 m (vertikal) und 0.14 m (horizontal) in unteren Wandbereichen bis hin zu 0.28 m (vertikal) und 0.67 m (horizontal) in oberen Fassadenregionen.

Sichthindernisse sind ein weiterer Grund für partiell geringe Punktdichten auf der Fassade. Abschattungen entstehen durch Objekte, die sich bei der Aufnahme zwischen Scanner und Fassadenfläche befinden. Alle Fassadenbereiche können davon betroffen sein. Auch in der Punkt wolke in Abbildung 6.4b sind Abschattungen zu sehen. Der wenige Punkte enthaltende Bereich am linken Fassadenrand ist auf eine Verdeckung durch einen Baum zurückzuführen; im Fassadenbereich rechts unten verhindern dichtes Buschwerk und ein Vordach eine bessere Punktabdeckung.

Häufig sind Lücken in der Punkt wolke auch die Folge von spiegelnden oder nicht reflektierenden Objektoberflächen. Im Fall von Fensterglas sind solche Lücken durchaus erwünscht, da sie die Grundlage für die Extraktion von Fensterstrukturen innerhalb der datengetriebenen Rekonstruktion bilden. Sie können - ähnlich wie die durch Verdeckungen hervorgerufenen datenfreien Regionen - in allen Fassadenbereichen vorkommen. Die Unterscheidung, ob es sich bei einer Lücke in der Punkt wolke um ein zu modellierendes Fenster oder einen abgeschatteten Bereich handelt, der als Wandbereich zu interpretieren und eventuell zu vervollständigen wäre, ist daher schwierig. Damit könnten ungewollt auch tatsächlich existierende, größere Fensterbereiche durch kleinere Fassadenstrukturen aufgefüllt werden. Um dies zu vermeiden, werden für die Vervollständigung ausschließlich dünn besetzte Punktebereiche an den Fassadenrändern berücksichtigt. Auf dieser Zielsetzung basiert die Art und Weise, wie der für die Grammatikableitung relevante Fassadenausschnitt bestimmt wird (Abschnitt 6.3.2).

6.3.2 Bestimmung des dichten Punktebereichs

Gesucht ist ein Ausschnitt auf der Fassade, in dem die Wandpartien durch genügend dichte Laserpunkte abgetastet sind, um daraus zuverlässig Fensterstrukturen extrahieren zu können. Im Folgenden wird ein solcher Ausschnitt als *dichter Punktebereich* bezeichnet. Ein dichter Punktebereich ist definiert als eine zusammenhängende, konvexe Region auf der Fassade, innerhalb derer die Punktdichte signifikant über dem Durchschnittswert für die gesamte Fassade liegt. Als zentraler Planungsparameter für den Scanprozess lässt sich der Abtastabstand und damit die zu erwartende Punktdichte auf der Fassade bereits im Vorfeld der Messkampagne abschätzen. Sie ergibt sich aus dem Abstand des Laserscanners zum Objekt sowie aus weiteren, vom jeweils verwendeten Scansystem abhängigen Einstellungen. So ist beispielsweise beim Leica HDS3000-Scanner die gewählte Winkelauflösung entscheidend, während beim mobilen Laserscanning, etwa dem StreetMapper-System, zusätzlich die Fahrgeschwindigkeit eine wichtige Rolle spielt. Der auf diese Weise abschätzbare Punkteabstand am Objekt ist jedoch nur ein theoretischer

Wert, der die Situation auf einer ebenen verdeckungsfreien Objektoberfläche mit konstanten Reflexionseigenschaften beschreibt. Nicht berücksichtigt sind punktfreie Bereiche, die bei Fassaden etwa durch Glasflächen oder Sicht Hindernisse hervorgerufen werden. Die theoretisch ermittelte Punktdichte ist demnach in diesem Fall zu groß. Im hier vorgestellten Verfahren wird die tatsächliche Punktdichte daher aus den Beobachtungsdaten selbst abgeleitet. Lokale Punktdichten werden berechnet und in einer sogenannten Punktabstandskarte gespeichert. Sie bildet die Grundlage für die Bestimmung des gesuchten dichten Punktebereichs. Folgende Schritte werden durchlaufen:

1. Leite aus allen 3D-Punkten, die in der Fassadenebene liegen, eine Punktabstandskarte ab.
2. Bestimme aus der zweidimensionalen Punktabstandskarte eine eindimensionale Punktabstandsfunktion für die Spalten. Suche darin einen zusammenhängenden Bereich kleiner Punktabstände und markiere die entsprechenden Spalten.
3. Bestimme für die markierten Spalten eine eindimensionale Punktabstandsfunktion für die Zeilen. Suche darin einen zusammenhängenden Bereich kleiner Punktabstände und markiere die entsprechenden Zeilen.
4. Verschneide die markierten Spalten und Zeilen und erhalte daraus den Punktebereich B_{vh} .
5. Wiederhole die Schritte 2 bis 4 und vertausche darin die Wörter „Spalten“ und „Zeilen“ beziehungsweise die Buchstaben „v“ und „h“.
6. Berechne für die Bereiche B_{vh} und B_{hv} jeweils den durchschnittlichen Punktabstand. Falls sich die beiden Werte signifikant unterscheiden, wähle den Bereich mit dem kleineren Punktabstand als dichten Punktebereich; andernfalls wähle den Bereich mit dem größeren Flächeninhalt.

In Schritt 1 wird die für das weitere Vorgehen benötigte Information über die Dichte der Fassadenpunkte bereitgestellt. Dies geschieht in Form einer *Punktabstandskarte*. Es handelt sich dabei um ein Grauwertbild, in dem jedes Pixel ein Gitterelement auf der Fassade repräsentiert. Die Fassade wird hierfür virtuell mit einem gleichmäßigen Raster überzogen. Die Zellgröße sollte mindestens doppelt so groß sein wie der theoretische Abtastabstand am Objekt, der aus der Scankonfiguration abgeschätzt werden kann. Liegen keine derartigen Informationen vor, kann die optimale Rastergröße abgeschätzt werden, indem für eine Menge zufällig ausgewählter Fassadenpunkte jeweils der Abstand zum nächsten Nachbarn bestimmt wird. Für jede Zelle wird der durchschnittliche Punktabstand aller darin enthaltenen Fassadenpunkte berechnet. Ist die Zelle leer, wird ihr ein Maximalwert zugeordnet, welcher genau der Zellgröße entspricht. Als Grauwerte interpretiert, werden die pro Zelle bestimmten Punktabstände den jeweiligen Pixeln in der Punktabstandskarte zugewiesen. Die Repräsentation der Dichteinformation als Bild ermöglicht die Anwendung von Operatoren der Bildverarbeitung. Wie in den folgenden Schritten gezeigt werden wird, ermöglichen schnell durchführbare Filteroperationen nicht nur die Bestimmung der globalen Punktdichte für die gesamte Fassade. Auch lokale Punktdichten für beliebige Fassadenausschnitte lassen sich sehr einfach ermitteln.

Schritt 2 leitet aus der Punktabstandskarte eine eindimensionale Punktabstandsfunktion ab, die die durchschnittlichen Punktabstände pro Spalte beschreibt. Diese ergeben sich aus der Faltung der Punktabstandskarte mit einem Boxfilter der Dimension $n_r \times 1$, wobei n_r die Zeilenanzahl der Punktabstandskarte ist. Anschließend wird innerhalb der Funktion ein zusammenhängender Spaltenbereich kleiner Punktabstände gesucht. Die Grenzen dieses Bereichs werden bestimmt, indem zwei vertikale Linien über Punktabstandsfunktion und -karte geschoben werden: eine von links nach rechts, die andere in umgekehrter Richtung. Der Vorgang endet, sobald die Abstandsfunktion unter einen Schwellwert fällt, der sich an der durchschnittlichen Punktdichte der gesamten Fassade orientiert. Diese Vorgehensweise entspricht der in Abschnitt 6.3.1 definierten Zielstellung, der Detektion und Vervollständigung von dünnen Datenbereichen, die sich an den Rändern der Fassade befinden. Die Spalten, die innerhalb der gefundenen vertikalen Grenzen liegen, werden markiert.

Nachdem in Schritt 2 die Spalten der Punktabstandskarte ausgewertet wurden, verfährt Schritt 3 in ähnlicher Weise mit den Zeilen. Die durchschnittlichen Punktabstände für alle Zeilen der Punktabstandskarte werden ermittelt und als eindimensionale Funktion dargestellt. In die Berechnung fließen jedoch nicht alle Pixel einer Zeile ein, sondern nur diejenigen, die sich im zuvor markierten Spaltenbereich befinden. Realisiert wird dies über einen Filter der Größe $1 \times n_c$, in dem die Elemente c_{links} bis c_{rechts} gleich eins und alle anderen gleich null sind. n_c bezeichnet dabei die Spaltenanzahl der Punktabstandskarte; c_{links} und c_{rechts} sind die in Schritt 2 gefundenen vertikalen Grenzen.

Analog zu Schritt 2 wird nun ein zusammenhängender Zeilenbereich kleiner Punktabstände gesucht, indem horizontale Linien über Funktion und Karte geschoben werden. Das Ergebnis sind horizontale Begrenzungen, definiert durch die Zeilen r_{unten} und r_{oben} .

Schritt 4 beinhaltet schließlich die Verschneidung der gefundenen Spalten- und Zeilenbereiche. Es entsteht ein Punktebereich B_{vh} mit Spalten der Anzahl $c_{\text{rechts}} - c_{\text{links}} + 1$ und Zeilen der Anzahl $r_{\text{oben}} - r_{\text{unten}} + 1$. Der Index „ vh “ des Punktebereichs B steht für die Reihenfolge, in der seine Begrenzungslinien festgelegt wurden: zuerst die vertikalen, dann die horizontalen. Die Bestimmung der Bereichsgrenzen in umgekehrter Reihenfolge kann unter Umständen zu einem anderen Gebiet auf der Fassade führen. Dies wird geprüft (Schritt 5), indem in analoger Weise zum bisher beschriebenen Vorgehen ein solcher Punktebereich B_{hv} ermittelt wird.

In Schritt 6 folgt schließlich die Entscheidung, welcher der Bereiche B_{vh} und B_{hv} als dichter Punktebereich ausgewählt wird. Dazu wird zunächst für beide Regionen der durchschnittliche Punktabstand über einen geeigneten Filter berechnet. Unterscheiden sich die zwei Werte signifikant, wird dem Punktebereich mit dem kleineren durchschnittlichen Punktabstand der Vorzug gegeben, da dort eine bessere Punktabdeckung der Wandbereiche vermutet wird. Liegt kein signifikanter Unterschied vor, wird der Bereich mit dem größeren Flächeninhalt als dichter Punktebereich ausgewählt. Je größer der Punktebereich, desto mehr Information über die Fassadengeometrie ist zu erwarten.

Abbildung 6.5 enthält für das Beispiel aus Abbildung 6.4 die zugehörige Punktabstandskarte. Ein Pixel entspricht einem $18\text{ cm} \times 18\text{ cm}$ großen Rasterelement auf der Fassade. Dunkle Grauwerte zeigen kleine Punktabstände und damit hohe Punktdichten an. Umgekehrt stehen helle Grauwerte für große Punktabstände und geringe Punktdichten. Der detektierte dichte Punktebereich ist rot eingefärbt. Er entspricht dem Bereich B_{vh} , wurde also zunächst durch die vertikalen und dann durch die horizontalen Grenzen festgelegt. Die dabei verwendeten Punktabstandsfunktionen für die Spalten und Zeilen sind unterhalb beziehungsweise links vom Grauwertbild aufgetragen. Die gefundenen Spalten- und Zeilenbereiche sind darin jeweils rot dargestellt.

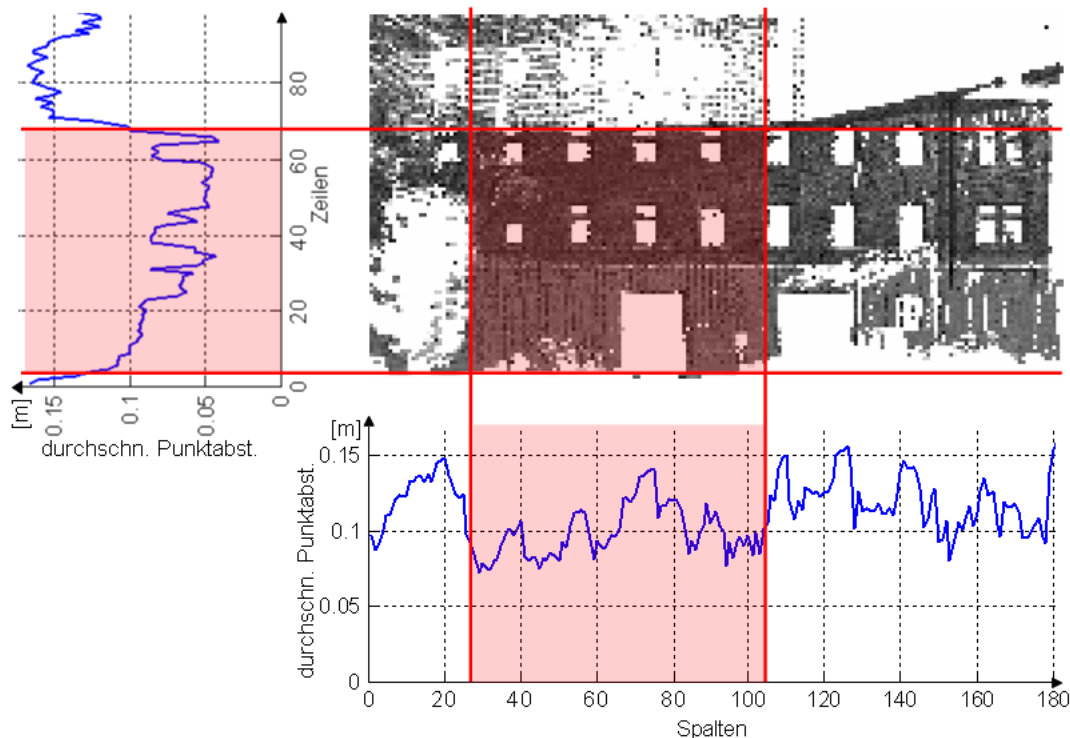


Abbildung 6.5: 2D-Punktabstandskarte (oben rechts) und zugehörige 1D-Punktabstandsfunktionen für die Spalten (unten) und Zeilen (links).

6.3.3 Vervollständigung durch Erzeugung von Fassadenstrukturen

Nachdem der dichte Punktebereich bestimmt ist, kann er als Maske verwendet werden, die über das datengetriebene rekonstruierte 3D-Fassadenmodell gelegt wird. Nur der Bereich, der innerhalb der Maske liegt, wird für die nachfolgende Grammatikableitung berücksichtigt. Die daraus resultierende Fassadengrammatik repräsentiert somit Fassadengeometrien, die mit hoher Zuverlässigkeit aus den Sensordaten extrahiert werden konnten. Auf Basis dieser Grammatik können die nur unzureichend mit Sensordaten erfassten Fassadenbereiche, die außerhalb der Maske liegen, mit realistischen Fassadenstrukturen vervollständigt werden. Dies geschieht über den Produktionsprozess. Im Unterschied zum in Abschnitt 6.1 beschriebenen Ablauf der Produktion, ist hier der Ausgangspunkt jedoch kein leeres Fassadenpolygon, sondern der bereits existierende Fassadenstring, der das Ergebnis der datengetriebenen Rekonstruktion darstellt. Alle Zeichenketten, die außerhalb der Maske gelegene Fassadenbereiche repräsentieren, werden durch ein einzelnes Nichtterminal W ersetzt. Dadurch werden die entsprechenden Bereiche für die grammatikbasierte Modellierung freigegeben und können nach dem bekannten Produktionsverfahren substituiert werden.

In Abbildung 6.6 ist für das Beispiel aus Abbildung 6.5 das 3D-Fassadenmodell vor und nach der Vervollständigung gegeben. Im Ergebnis der datengetriebenen Rekonstruktion (Abbildung 6.6a) ist der für die Grammatikableitung ausgewählte Fassadenbereich rot eingegrenzt. Außerhalb dieses Bereichs sind deutliche Rekonstruktionsfehler zu sehen, die nach der Vervollständigung durch realistische Fassadenstrukturen ersetzt werden können (Abbildung 6.6b). Eine exakte Übereinstimmung mit der Wirklichkeit kann in diesen Bereichen aufgrund des Synthetisierungsprozesses nicht vorausgesetzt werden.

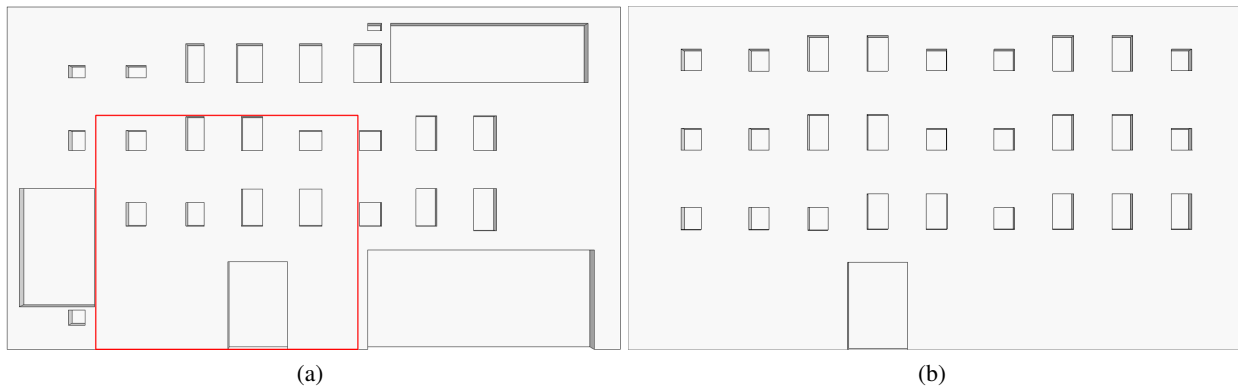


Abbildung 6.6: Beispiel für die Vervollständigung von Fassadenstrukturen: vorher (a), nachher (b).

6.4 Verifikation

Außer für die Modellierung völlig unbeobachteter Fassaden (Abschnitt 6.1) und die Vervollständigung von nur teilweise mit Sensordaten erfassten Gebäudeteilen (Abschnitt 6.3) kann die Grammatik dazu genutzt werden, das Ergebnis der datengetriebenen Rekonstruktion zu verbessern und so robuster gegenüber den fehlerbehafteten Sensordaten zu machen. Dies geschieht über einen Verifikationsprozess, der durch von der Grammatik generierte Hypothesen gesteuert wird. Das Prüfen der Hypothesen erfordert von der Grammatik unabhängige Zusatzinformationen. Dabei kann es sich um jegliche Art von Referenzdaten handeln. Denkbar sind unter anderem 3D-Fassadenmodelle höherer Genauigkeit aus anderen Quellen, Bilddaten oder aus Planungsentwürfen entnommene Informationen. Die Art der Daten bestimmt, wie die eigentliche Verifikation der Hypothesen realisiert wird. Als ein mögliches Verfahren wird in dieser Arbeit beispielhaft ein bildbasierter Ansatz vorgestellt. Genutzt werden entzerrte Fassadenbilder, um die aufgestellten Hypothesen anzunehmen oder zu verwerfen. Unter der Annahme, dass die verarbeitete Bildinformation die Realität besser repräsentiert als das untersuchte Fassadenmodell, können auf diese Weise fehlerhafte Strukturen erkannt und ersetzt werden. Der Verifikationsprozess beschränkt sich dabei auf die Elimination

eines bestimmten Fehlertyps, der in Abschnitt 6.4.1 präzisiert wird. Das Prinzip der grammatikgesteuerten Hypothesentests wird in Abschnitt 6.4.2 erläutert.

6.4.1 Zielvorgabe der Verifikation

Das Ergebnis der datengetriebenen Rekonstruktion ist abhängig von der Qualität der Sensordaten. Hierbei spielen Faktoren wie Messrauschen, Punktdichte oder Spotgröße am Objekt eine Rolle. Darüber hinaus ist entscheidend, wie gut die Punktwolke die Modellvorstellung widerspiegelt, auf der der Ansatz des Rekonstruktionsverfahrens gründet. Fenster können korrekt erkannt werden (Kapitel 4), wenn die in Abschnitt 4.2.1 genannten Annahmen erfüllt sind, dass Wandregionen durch gleichmäßig verteilte Fassadenpunkte repräsentiert sind (Annahme 1) und Fensterbereiche keine Laserpunkte in der Fassadenebene enthalten (Annahme 2). Ist eine der beiden Annahmen verletzt, können fehlerhafte Strukturen entstehen. Dabei lassen sich zwei Arten von Rekonstruktionsfehlern unterscheiden:

- Fehlertyp 1: Falsche oder zu große Fenster, hervorgerufen durch die Verletzung der Annahme 1.
- Fehlertyp 2: Keine oder zu kleine Fenster, hervorgerufen durch die Verletzung der Annahme 2.

Wandbereiche, die gar nicht oder nur durch wenige Laserpunkte erfasst sind, widersprechen der Annahme 1 und geben Anlass zu Fehlinterpretationen. Sie stellen Lücken in der Punktwolke dar, die fälschlicherweise als Fensterregionen gedeutet werden können. Die Folge ist, dass entweder Fenster an Stellen modelliert werden, an denen sich in der Realität gar keine Wandöffnungen befinden, oder dass die Begrenzung von tatsächlichen Fenstern nicht korrekt rekonstruiert wird und somit zu große Fenster entstehen (Fehlertyp 1). Beide Varianten treten im Beispiel des Wohngebäudes aus Abbildung 6.6a auf (siehe auch Abbildung 4.20b). Mögliche Ursachen für die Verletzung der Annahme 1 sind Abschattungen durch nicht frontal erfasste Fassadenvorsprünge oder Verdeckungen bedingt durch Elemente der Straßenmöblierung oder mobile Objekte. Des Weiteren führen schräge Aufnahmewinkel zu einer schlechten Punktabdeckung (Abschnitt 6.3.1). Eine Fehlerquelle ganz anderer Art bilden Punktmessungen, die innerhalb einer Fensterregion vorliegen. Sie stehen der Annahme 2 entgegen, indem sie die Repräsentation des Fensters als „datenfreier“ Bereich verhindern. Abhängig von der Dichte und Verteilung dieser unerwarteten 3D-Punkte kann das Fenster entweder gar nicht oder nur partiell erkannt werden (Fehlertyp 2). Die beschriebenen Punktbeobachtungen treten typischerweise an Fenstergittern auf, sowie an teilweise oder vollständig geschlossenen Außenjalousien und Fensterläden (siehe Abbildung 4.20c).

Fehler des Typs 1 werden nach Möglichkeit schon während des Scanvorgangs durch eine geeignete Aufnahmekonfiguration vermieden. Beim statischen Laserscanning bieten sich überlappende Aufnahmen von mehreren Standpunkten an. Im Gegensatz dazu gestaltet sich die Realisierung eines verdeckungsfreien Scans beim mobilen Laserscanning schwierig, da die Trajektorie der mobilen Plattform an die vorhandenen Verkehrswege geknüpft ist. Eine Mehrfachaufnahme in unterschiedlichen Fahrtrichtungen kann hilfreich sein. Je nach Szenerie und Aufnahmesituation werden sich in der Regel Verdeckungen und schräge Blickwinkel nicht immer vermeiden lassen. Mit der grammatikbasierten Vervollständigung (Abschnitt 6.3) lassen sich jedoch auch für Bereiche mit ungenügender Punktabdeckung realistische Fassadenstrukturen erzeugen. Während diese Strategie Rekonstruktionsfehlern des Typs 1 entgegenwirkt, zielt der im Folgenden beschriebene Verifikationsprozess ausschließlich auf die Elimination von Fehlern des Typs 2 ab.

6.4.2 Verifikation der generierten Hypothesen

Um im Ergebnis der datengetriebenen Rekonstruktion fehlende oder falsche Fassadenelemente zu erkennen, reicht der Informationsgehalt der Grammatik nicht aus. Als Endprodukt der Wissensableitung sind in ihr alle Fehler abgebildet, die im datengetrieben erzeugten Fassadenmodell enthalten sind. Aus diesem Grund ist Zusatzinformation notwendig, die hier in Form von Fassadenbildern bereitgestellt wird. Unter der Voraussetzung ebener Fassadenflächen kann in einem Vorverarbeitungsschritt aufgrund der projektiven Beziehung zwischen Bild und Objekt eine

Korrektur des Bildes um perspektive Verzerrungen vorgenommen werden. Die Umbildung erfolgt durch die Gleichungen (6.38) und (6.39)

$$x' = \frac{ax + by + c}{gx + hy + 1} \quad (6.38)$$

$$y' = \frac{dx + ey + f}{gx + hy + 1}, \quad (6.39)$$

wobei x, y die Bildkoordinaten vor und x', y' die Bildkoordinaten nach der Entzerrung darstellen. Zur Bestimmung der acht Transformationsparameter a bis h sind mindestens vier Passpunkte notwendig, von denen nicht drei auf einer Geraden liegen dürfen. Eine andere Möglichkeit stellen Fluchtpunktalgorithmen dar, die auf der Detektion paralleler Linienpaare beruhen. Dazu gibt es eine Reihe vollautomatischer Verfahren (Kalantari et al., 2008), die hier jedoch nicht näher erläutert werden.

Nach der Bereitstellung der notwendigen Referenzinformation kann der Verifikationsprozess beginnen. Gesteuert wird dieser durch diejenigen Instanzierungsregeln, deren Nachfolger mindestens eine Geometrikachel aufweisen. Es handelt sich hierbei um Produktionsregeln des Typs 3 oder 4, durch die explizite 3D-Fassadengeometrie erzeugt wird. Für jede dieser Regeln werden Hypothesen über mögliche Anwendungsbereiche auf der Fassade generiert, die auf der Basis des entzerrten Fassadenbildes entweder akzeptiert oder verworfen werden. Entscheidend ist hierbei das Ergebnis einer Bildkorrelation zwischen dem ins Fassadenbild projizierten Anwendungsbereich der Hypothese und den Templates, die charakteristische Realisierungen der jeweiligen Instanzierungsregel im Fassadenbild darstellen. Im Detail läuft das Verfahren wie folgt ab:

1. Erzeuge eine Liste aus allen Instanzierungsregeln der Typen 3 und 4 und sortiere diese absteigend nach dem Flächeninhalt, den der jeweilige Regel-Nachfolger auf der Fassade einnimmt. Wähle die Instanzierungsregel mit der größten Fläche aus. Sie wird im Folgenden als die „aktuelle“ Instanzierungsregel bezeichnet.
2. Generiere eine Hypothese für den Fassadenbereich, auf den die aktuelle Instanzierungsregel angewendet werden kann, und projiziere diesen Bereich ins entzerrte Fassadenbild.
3. Bestimme die zur aktuellen Instanzierungsregel gehörenden Templates im Fassadenbild. Wähle aus der Menge dieser Templates das erste aus.
4. Berechne für alle möglichen Positionen innerhalb des in Schritt 2 berechneten Fassadenbereichs der Hypothese die Korrelation mit dem selektierten Template. Akzeptiere eine Position, falls der Korrelationswert einen zuvor gesetzten Schwellwert übersteigt.
5. Füge den Nachfolger der aktuellen Instanzierungsregel an jeder akzeptierten Position ein, falls es keine Überschneidung zu einem bereits existierenden Geometrieobjekt gibt, dessen Fläche größer gleich der Fläche des Nachfolgers ist. Falls bereits alle Templates der aktuellen Instanzierungsregel bearbeitet sind, fahre fort mit Schritt 6; andernfalls wähle aus der Menge der Templates das nächste aus und fahre fort mit Schritt 4.
6. Beende den Verifikationsprozess, falls bereits alle Instanzierungsregeln der Typen 3 und 4 bearbeitet sind; andernfalls selektiere die Instanzierungsregel mit der nächstgrößten Fläche und fahre fort mit Schritt 2.

In Schritt 1 werden zunächst alle Instanzierungsregeln der Typen 3 und 4 in einer Liste gesammelt und nach dem Flächeninhalt ihrer Nachfolgerelemente absteigend sortiert. Der Flächeninhalt ist dabei definiert als die Fläche desjenigen Rechtecks, das die im Nachfolger enthaltenen Geometrieobjekte minimal umschließt. Die sortierte Regel-Liste gibt im weiteren Verlauf des Verfahrens die Reihenfolge vor, in der die Instanzierungsregeln für die Generierung der Hypothesen ausgewählt werden. Startpunkt ist die Instanzierungsregel mit der größten Fläche.

Für die aktuell selektierte Regel wird in Schritt 2 eine Hypothese darüber aufgestellt, in welchen Fassadenregionen die Geometrieobjekte des Nachfolgers vorkommen können. In der Terminologie, die bei der Nichtterminal-Selektion (Abschnitt 6.1.1) gebraucht wurde, beschreibt die Hypothese somit einen Fassadenbereich, der für die Anwendung der aktuellen Regel *aktiv* ist. Die Bestimmung dieses aktiven Fassadenbereichs orientiert sich an der Stockwerkseinteilung, die im Zuge der Grammatikableitung für die untersuchte Fassade gefunden wurde (Abschnitt 5.1.1). So wird innerhalb jedes Stockwerks eine geometrische Pseudo-Instanz des Nachfolgers von links

nach rechts über die Fassade geschoben. Alle Bereiche, die dabei von Geometrieobjekten des Nachfolgers überstrichen werden, stellen einen potentiellen Anwendungsbereich für die Regel dar und werden folglich als *aktiv* markiert. Um möglichen Ungenauigkeiten der rekonstruierten Fassade und der daraus abgeleiteten Grammatik Rechnung zu tragen, werden die markierten Regionen um einen Pufferbereich in y-Richtung erweitert. Schließlich erfolgt die Projektion der als Hypothese aufgestellten aktiven Bereiche ins entzerrte Fassadenbild.

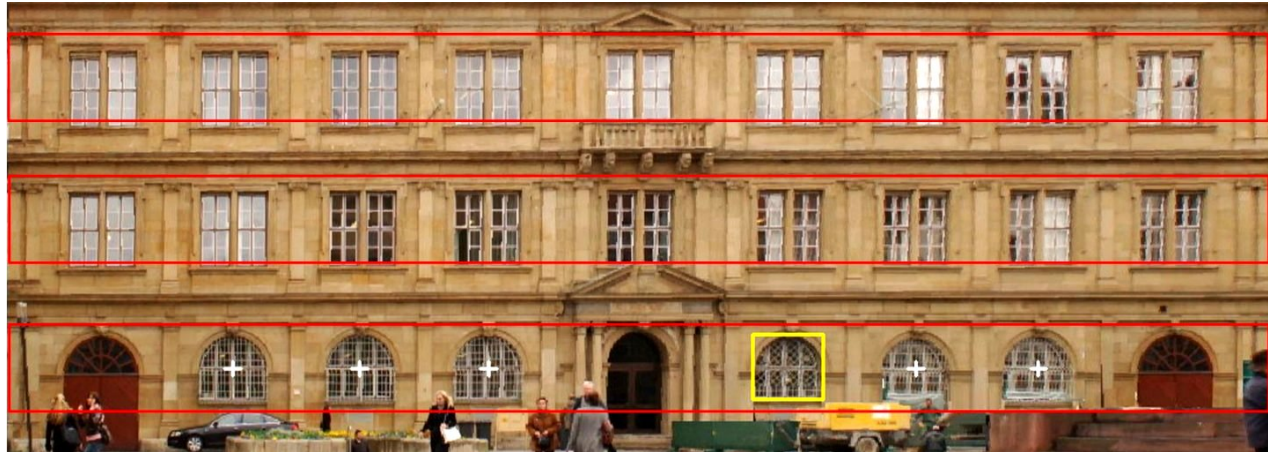
Die für die Bildkorrelation benötigten Templates werden in Schritt 3 bereitgestellt. Als Template wird hier eine Region im entzerrten Fassadenfoto bezeichnet, die die Geometrieobjekte des aktuellen Regel-Nachfolgers zeigt und daher als Suchmaske innerhalb der Bildkorrelation verwendet werden kann. Ziel ist, über die Korrelation dem Template ähnliche Bildbereiche zu finden, um so Hinweise auf mögliche weitere Instanzen des Regel-Nachfolgers zu erhalten. Der Bestimmung der Templates geht die Überlegung voraus, dass der Nachfolger einer jeden Instanzierungsregel mindestens einmal als geometrische Instanz in der rekonstruierten Fassade vertreten ist. Diese Instanzen befinden sich an unterschiedlichen Positionen auf der Fassade und verweisen dementsprechend auf verschiedene Bereiche im Bild. Die Begrenzung eines solchen Bildbereichs ergibt sich jeweils aus dem Rechteck auf der Fassade, das die Geometrieobjekte des Regel-Nachfolgers minimal umschließt. Zunächst wird für jede Instanz eines Regel-Nachfolgers ein eigenes Template erzeugt. Obwohl die so entstandenen Templates alle die gleiche Fassadengeometrie darstellen, können sich deren Grauwerte deutlich unterscheiden. Die Ähnlichkeit von Templates wird hier über die Bildkorrelation bewertet. Signifikante Unterschiede zwischen Templates können beispielsweise die Folge von auf der Fassade wechselnden Lichtverhältnissen, partiellem Schattenwurf oder unterschiedlich reflektierenden Oberflächen sein. Während signifikant verschiedene Templates beibehalten werden, können ähnliche Bildausschnitte durch Mittelbildung zu einem gemeinsamen Template zusammengefasst werden. Die Menge der verbleibenden Templates wird in den Schritten 4 und 5 sukzessive abgearbeitet.

Schritt 4 berechnet die Korrelation zwischen dem ins Bild projizierten aktiven Fassadenbereich der aufgestellten Hypothese und dem aktuell ausgewählten Template. Dabei werden Korrelationswerte für alle möglichen Positionen ermittelt, die das Template innerhalb dieses Bereichs einnehmen kann. Diejenigen Positionen, an denen der Korrelationswert einen vorgegebenen Schwellwert übersteigt, werden akzeptiert, alle anderen verworfen. Für die in dieser Arbeit vorgestellten Beispiele hat sich ein Schwellwert von 0.6 als sinnvoll erwiesen.

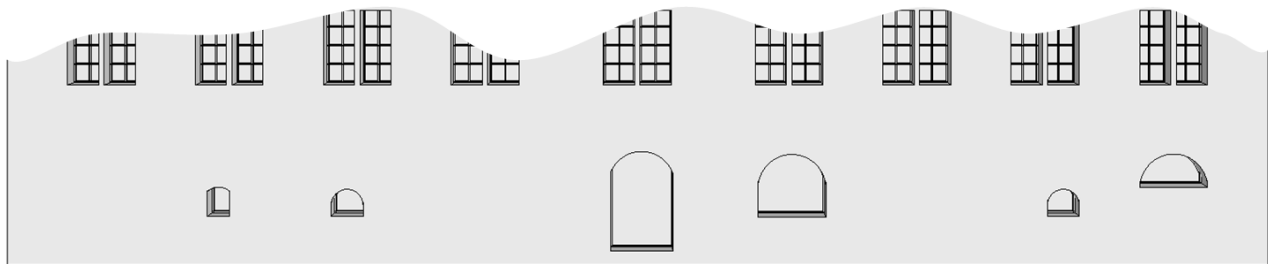
In Schritt 5 erfolgt schließlich die geometrische Realisierung der als wahr angenommenen Positions-Hypothesen. Dabei werden die Geometrieobjekte des Regel-Nachfolgers jedoch nur dann an einer akzeptierten Position eingefügt, wenn dies keine Überschneidung mit einer bereits existierenden Fassadenstruktur zu Folge hat, deren Fläche größer gleich der Fläche des Nachfolgers ist. Überschneidungskonflikte mit vorhandenen Fassadenelementen kleineren Flächeninhalts werden gelöst, indem die kleineren Strukturen entfernt werden. Die Motivation dieser Vorgehensweise entspringt aus der in Abschnitt 6.4.1 definierten Zielvorgabe, der Elimination von Rekonstruktionsfehlern des Fehlertyps 2.

Nachdem die Hypothesen für alle Templates der aktuellen Instanzierungsregel geprüft sind (Schritte 4 und 5), wird in Schritt 6 die Instanzierungsregel mit der nächstgrößten Fläche ausgewählt. Der Verifikationsprozess endet, wenn alle Regeln der in Schritt 1 aufgestellten Liste bearbeitet sind.

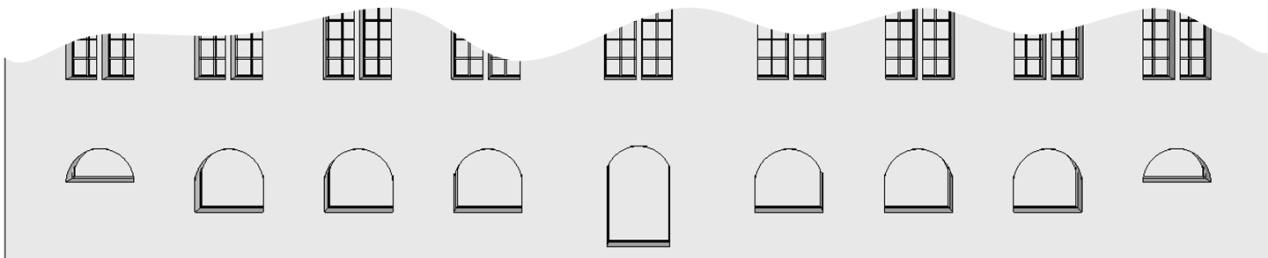
Durch die Anwendung des beschriebenen Verifikationsverfahrens ändert sich das Ergebnis der datengetriebenen Rekonstruktion und damit auch die Wissensbasis, auf deren Grundlage die zugehörige Fassadengrammatik generiert wurde. Werden Verifikation und Grammatikableitung iterativ durchgeführt, lassen sich sowohl das Fassadenmodell als auch die Grammatik sukzessive verbessern. Der Prozess endet, wenn sich die rekonstruierte Fassade nicht mehr ändert. Abbildung 6.7 stellt die Auswirkung der Verifikation auf das Erdgeschoss des Prinzenbaus dar. Ein Vergleich des Fassadenmodells vor der Verifikation (Abbildung 6.7b) mit dem entzerrten Fassadenbild (Abbildung 6.7a) offenbart Rekonstruktionsfehler des Fehlertyps 2. Sie können auf der Grundlage der vorliegenden Bildinformation über den beschriebenen Verifikationsprozess beseitigt werden. Im Fassadenbild sind beispielhaft für das Geometrieobjekt, das sich rechts neben der Tür befindet, das zugehörige Template (gelbes Rechteck) sowie die Projektionen der prognostizierten aktiven Fassadenbereiche (rote Rechtecke) markiert. Die darin akzeptierten Positionen sind durch weiße Kreuze gekennzeichnet.



(a)



(b)



(c)

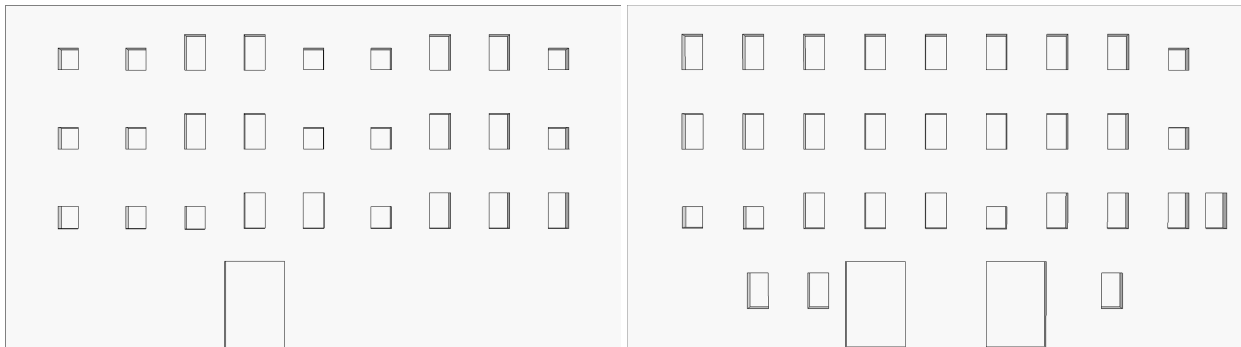
Abbildung 6.7: Datensatz „Prinzenbau, Stuttgart“: entzerrtes Fassadenbild (a), 3D-Fassadenmodell nach datengetriebener Rekonstruktion (b), verbessertes 3D-Fassadenmodell nach Verifikation (c).

Eine Verifikation des Fassadenmodells ist nicht nur sinnvoll für Fassadenbereiche, die auf der Grundlage von Sensordaten rekonstruiert wurden. Liegt die entsprechende Bildinformation vor, können ebenso Verbesserungen für solche Regionen erzielt werden, die mit Hilfe der Grammatik vervollständigt wurden. Abbildung 6.8 zeigt dies am Beispiel aus Abschnitt 6.3. Im Ergebnis der grammatikbasierten Vervollständigung (Abbildung 6.8b) sind einige Fassadenstrukturen falsch oder nicht vorhanden. Auf der Grundlage des vorliegenden Fassadenbildes (Abbildung 6.8a) können die meisten Rekonstruktionsfehler innerhalb des Verifikationsprozesses korrigiert werden (Abbildung 6.8c). Fehler verbleiben dann, wenn die betroffenen Fassadenregionen im Bild aufgrund von Verdeckungen nicht oder nur teilweise sichtbar sind (siehe linker und rechter Fassadenrand in Abbildung 6.8c). Die Verwendung einer ganzen Bildfolge anstelle eines Einzelbildes könnte hier Abhilfe schaffen (Böhm, 2004).

Generell ist die Verifikation als rein optionaler Arbeitsschritt zu verstehen, mit der sich Fassadenmodell und die daraus abgeleitete Grammatik verbessern lassen. Das Vorliegen der dazu notwendigen Referenzinformation stellt keine Grundvoraussetzung an die in dieser Arbeit vorgestellte grammatikbasierte Fassadenmodellierung dar.



(a)



(b)

(c)

Abbildung 6.8: Datensatz „Wohngebäude, Stuttgart“: entzerrtes Fassadenbild (a), 3D-Fassadenmodell nach grammatikbasierter Vervollständigung (b), verbessertes 3D-Fassadenmodell nach Verifikation (c).

7 Ergebnisse und Diskussion

Zentrales Anliegen dieser Arbeit war es, ein Verfahren für die Fassadenrekonstruktion zu entwickeln, das auch dann noch realistische Fassadenstrukturen erzeugt, wenn die Qualität verfügbarer Beobachtungsdaten für eine zuverlässige Rekonstruktion nicht ausreicht. Realisiert wurde dies durch eine Kombination aus datengetriebenen und wissensbasierten Methoden. Das Verfahren wird dadurch zum einen flexibel in der Erfassung auftretender Formen von Fassadenelementen; zum anderen garantiert es die topologische Korrektheit der rekonstruierten Strukturen und wird robust gegenüber unvollständigen und qualitativ ungenügenden Sensordaten. Während andere Ansätze zur Fassadenrekonstruktion, die ebenfalls formale Grammatiken nutzen, auf manuelle Interaktion bei der Fassadeninterpretation (Aliaga et al., 2007; Hohmann et al., 2009) oder bei der Festlegung der Regeln (Müller et al., 2006b) angewiesen sind, ist das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren in allen Einzelschritten vollautomatisch. Das Herzstück bildet dabei die automatische Ableitung einer Fassadengrammatik aus datengetrieben rekonstruierten Fassadengeometrien, die eine aufwendige manuelle Regeldefinition erspart. Durch sie soll die Stilrichtung des Gebäudes in ihren charakteristischen Merkmalen erfasst werden. Es entsteht ein individuelles, den Stil des jeweiligen Gebäudes repräsentierendes Regelsystem, das die Vervollständigung nicht beobachteter Gebäudebereiche durch realistische Fassadenstrukturen ermöglichen soll. Einen ersten Eindruck davon, wie gut dies gelingt, liefern die in Abschnitt 7.1 gezeigten Beispiele. Abschnitt 7.2 geht darüber hinaus und bewertet die Qualität prozedural generierter Fassadenstrukturen auf Basis messbarer, für die Stilrichtung wesentlicher Fassadeneigenschaften. Die Anwendbarkeit des Verfahrens auf Daten unterschiedlicher Herkunft wird in Abschnitt 7.3 diskutiert. Untersucht wird hier außerdem das Vermögen, verschiedene architektonische Stilrichtungen zu erfassen und adäquat wiederzugeben, sowie die Eignung für die grammatikbasierte Fassadenmodellierung nicht nur einzelner Gebäude, sondern auch ausgedehnter Bereiche. Abschnitt 7.4 geht schließlich auf Beschränkungen des Ansatzes ein und zeigt Erweiterungsmöglichkeiten auf.

7.1 Beispiele für grammatikbasierte Rekonstruktion

Im Folgenden werden Ergebnisse des in dieser Arbeit entwickelten Ansatzes zur Fassadenrekonstruktion präsentiert. Die aufgeführten Beispiele basieren auf Datensätzen, die bereits im Zusammenhang mit dem in Kapitel 4 beschriebenen datengetriebenen Ansatz eingeführt wurden. Aufnahmeconfigurationen, wie sie beim Einsatz von statischem oder mobilem Laserscanning typisch sind, sind in Abbildung 7.1a und b exemplarisch für die Datensätze Schillerplatz und Linden-Museum dargestellt. Abbildung 7.1c enthält die komplette Punktwolke, die mit dem StreetMapper-System innerhalb einer circa halbstündigen Messfahrt durch Stuttgart aufgenommen wurde; der Bereich des Linden-Museums ist durch ein rotes Polygon gekennzeichnet.

Die im Bereich des Schillerplatzes für die Alte Kanzlei und den Prinzenbau erfassten Punktwolken stammen aus 360°-Scans, durchgeführt mit dem Leica HDS3000-Scanner. Während für die Aufnahme der Frontfassaden geeignete Standpunkte gefunden werden konnten (in Abbildung 7.1a jeweils durch Kreuze markiert), ist dies aufgrund einer hohen Gebäudedichte und unzugänglichen Bereichen für die seitlichen und rückwärtigen Fassaden nicht möglich. Generell ist die nur unvollständige Erfassung von Gebäuden auch eine häufige Folge des mobilen Laserscannings, da hier nur die der Straße zugewandten Fassaden beobachtet werden können. So sind etwa im Fall des Linden-Museums lediglich für die in Abbildung 7.1b gezeigte Gebäudeseite 3D-Punkte in der geforderten Dichte verfügbar. Auf solche dichten Punktebereiche beschränkt, werden die Fassadenstrukturen aus der datengetriebenen Rekonstruktion in individuelle Fassadengrammatiken abgebildet und in dieser Form für die Modellierung der übrigen Gebäudeflächen genutzt. Die resultierenden Fassadenmodelle beider Datensätze sind in Abbildung 7.2a-d

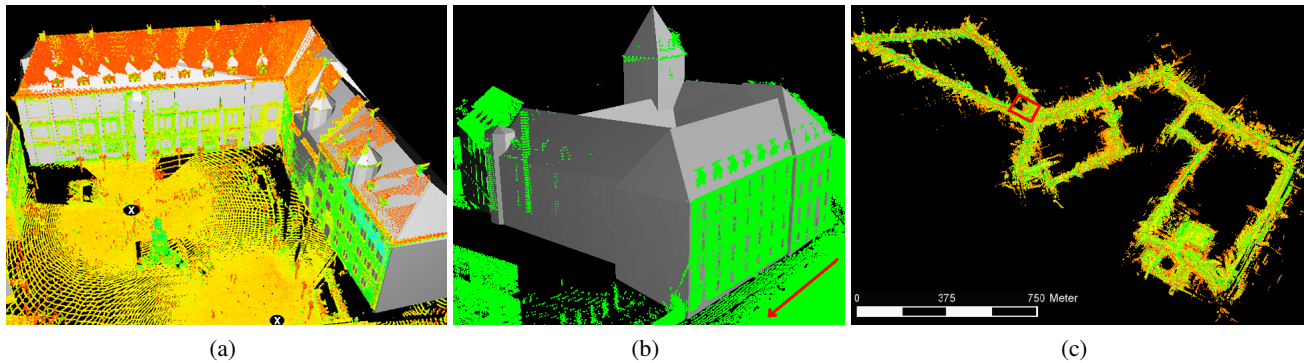
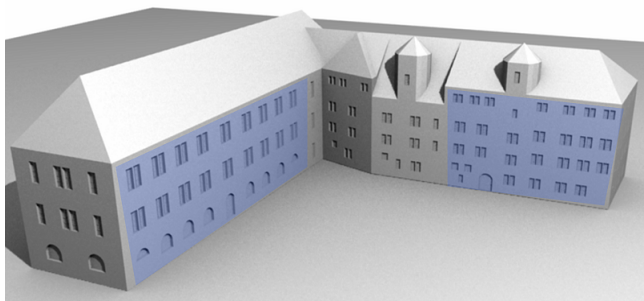


Abbildung 7.1: Typische Aufnahmekonfigurationen für statisches Laserscanning am Beispiel des Schillerplatzes (a) sowie für mobiles Laserscanning am Beispiel des Linden-Museums (b) (Fahrtrichtung durch Pfeil markiert); Übersicht über die mit dem StreetMapper in Stuttgart erfasste Punktwolke (c) (Bereich des Linden-Museums durch Polygon markiert).

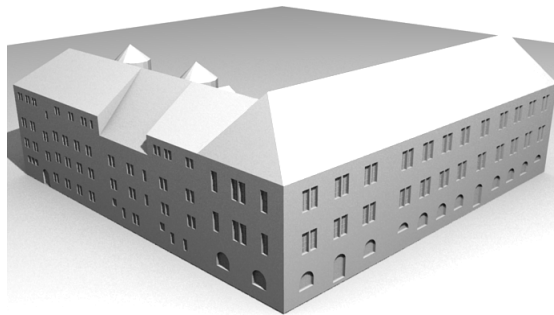
jeweils in zwei verschiedenen Ansichten zu sehen. Fassadengeometrien, die direkt aus den 3D-Punkten extrahiert wurden, sind blau eingefärbt. Alle restlichen Fassaden wurden jeweils mit den in diesen Regionen abgeleiteten Grammatiken synthetisiert. Während hier zumindest eine Fassade vollständig beobachtet werden konnte, treten in den folgenden beiden Beispielen typische Probleme der Datenerfassung mit mobilen Laserscanning-Systemen zutage. Ungünstige Aufnahmekonfigurationen, die sich in verhältnismäßig schmalen, von hohen Gebäuden gesäumten Straßen ergeben, führen zu schrägen Blickwinkeln in oberen Fassadenbereichen und damit zu Punktdichten, die für eine sichere datengetriebene Rekonstruktion nicht mehr ausreichen. So konnten nur für die unteren drei Stockwerke des Bürogebäudes in Abbildung 7.2f zuverlässig Fassadenstrukturen aus der zur Verfügung stehenden Punktwolke extrahiert werden (siehe auch Abbildung 4.20a). Mit Hilfe der im markierten Bereich abgeleiteten Grammatik konnten die Frontfassade, der Dachaufsatz sowie sämtliche andere Gebäudeseiten vervollständigt werden. Eine ähnliche Ausgangssituation liegt für das Wohngebäude aus Abbildung 7.2e vor, das bereits in Abschnitt 6.3 zur Erläuterung der grammatikbasierten Vervollständigung diente. Die beobachtete Punktwolke ist hier nicht nur aufgrund schräger Aufnahmewinkel am oberen Fassadenrand in ihrer Dichte stark reduziert, sondern sie weist zusätzlich durch Verdeckungen auch in unteren Fassadenbereichen größere Lücken auf. Obwohl der Aufbau der Fassadengrammatik folglich auf einen entsprechend kleinen Fassadenausschnitt begrenzt ist, ergibt die grammatikbasierte Verifikation und Vervollständigung ein realistisches Fassadenmodell. Die Anwendung einer Fassadengrammatik auf gleich mehrere Nachbarhäuser wurde für das in Abschnitt 4.5.2 bearbeitete „Red House Farm“-Gebäude durchgeführt (Abbildung 7.2g).

In den bisher dargestellten Ergebnissen wurde das Prinzip der grammatikgestützten Rekonstruktion in erster Linie dazu verwendet, die Fassadenstrukturen einzelner, nur teilweise beobachteter Gebäude zu vervollständigen. Stehen jedoch aus früheren Projekten bereits Fassadengrammatiken in einer Art Bibliothek zur Verfügung, können diese ebenso für die Fassadenmodellierung solcher Gebäude genutzt werden, für die überhaupt keine Beobachtungsdaten vorliegen. Die Abbildungen 7.3 bis 7.5 demonstrieren diesen Vorgang anhand mehrerer Beispiele. Sie zeigen jeweils einen ausgedehnten Ausschnitt der Stuttgarter Innenstadt, einmal als Ergebnis der Fassadenmodellierung und einmal als reale Luftbildaufnahme in Schrägsicht (Quelle: Bing Maps, <http://www.bing.com/maps/>). Die als Datengrundlage eingesetzten LOD2-Gebäudemodelle entstammen dem vom Stadtmessungsamt Stuttgart bereitgestellten 3D-Stadtmodell. Die in Abbildung 7.3 veranschaulichte Szene zeichnet sich durch eine große Vielfalt unterschiedlicher Gebäudetypen aus. Für ihre Modellierung wurde daher eine Fassadengrammatik verwendet, deren Fensterobjekte und Strukturen sowohl für kleine als auch für große Gebäude realistisch sind. Die Fassadenmodelle des Wohngebiets aus Abbildung 7.4 wurden mit Hilfe dreier verschiedener Fassadengrammatiken erzeugt, die zuvor von stilistisch ähnlichen Gebäuden aus dem näheren Umfeld abgeleitet wurden. Die Zuweisung einer Grammatik zu einem Gebäude erfolgte dabei zufällig. In Abbildung 7.5 ist im Vordergrund der Schillerplatz mit dem Alten Schloss, der Alten Kanzlei und der Stiftskirche zu sehen, im Hintergrund ragt das am Marktplatz gelegene Rathaus empor. Die geometrische Anreicherung der LOD2-Gebäudemodelle wurde hier auf Basis der Fassadengramma-

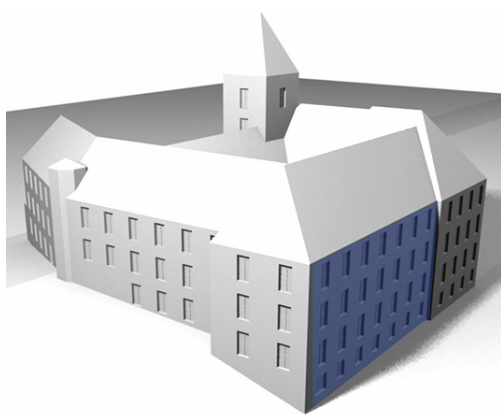
tik der Alten Kanzlei vorgenommen. Ihre Anwendung wirkt sich in zweierlei Hinsicht vorteilhaft aus. Zum einen garantiert sie eine realistische Repräsentation der Gebäude des Schillerplatzes, die allesamt im selben Zeitraum (Mitte 16. bis Anfang 17. Jahrhundert) wie die Alte Kanzlei selbst erbaut wurden. Zum anderen sind die in dieser Grammatik abgebildeten Fenstertypen und -konfigurationen neutral genug, um auch in den übrigen Bereichen der Szene glaubwürdige Fassadenmodelle zu generieren.



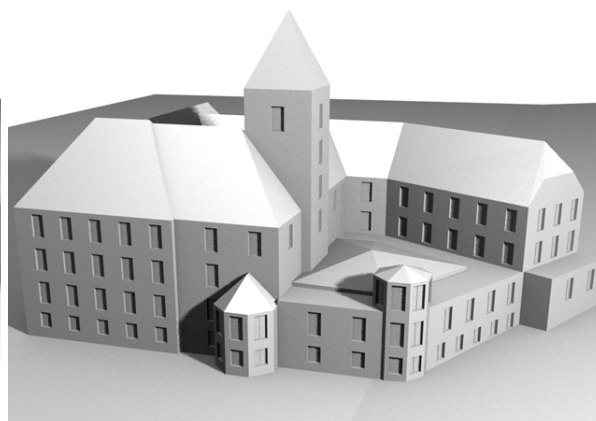
(a) Prinzenbau und Alte Kanzlei, Frontansicht



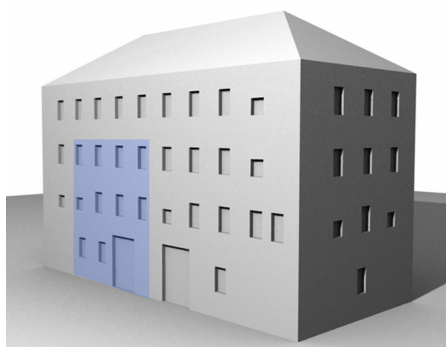
(b) Prinzenbau und Alte Kanzlei, Rückansicht



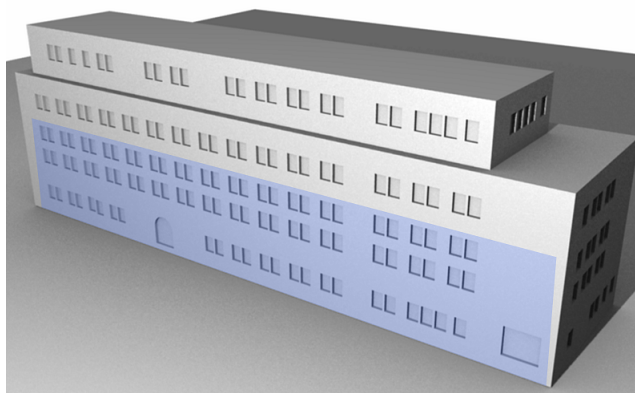
(c) Linden-Museum, Südwest-Ansicht



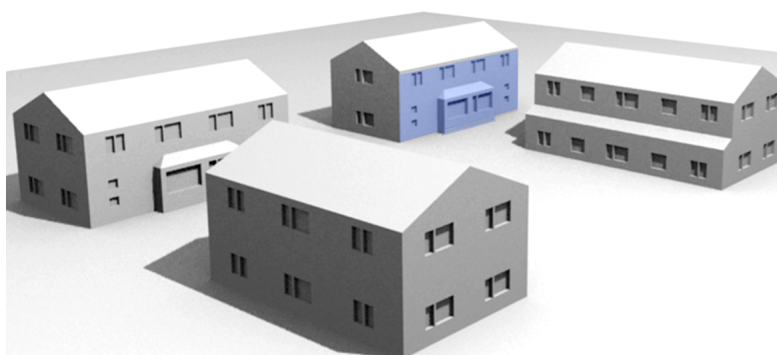
(d) Linden-Museum, Ost-Ansicht



(e) Wohngebäude

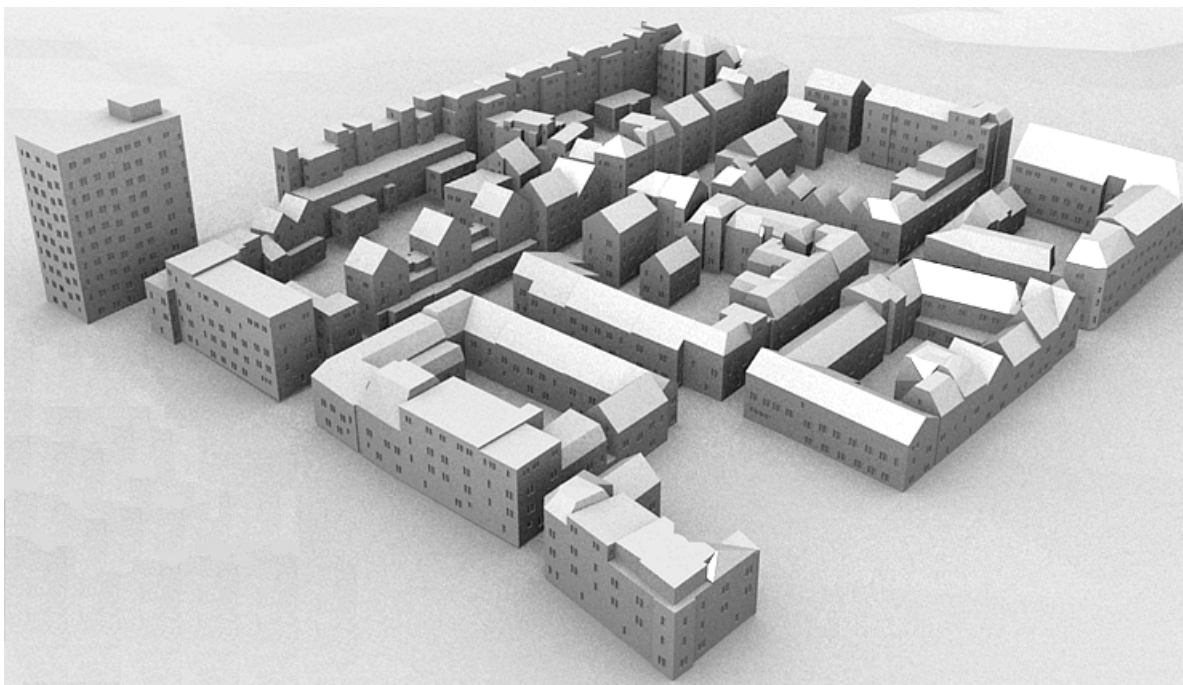


(f) Bürogebäude



(g) Red House Farm

Abbildung 7.2: 3D-Fassadenmodelle als Ergebnis der Fassadenrekonstruktion aus heterogenen Sensordaten. Blau markierte Regionen zeigen Bereiche der Grammatikableitung an.

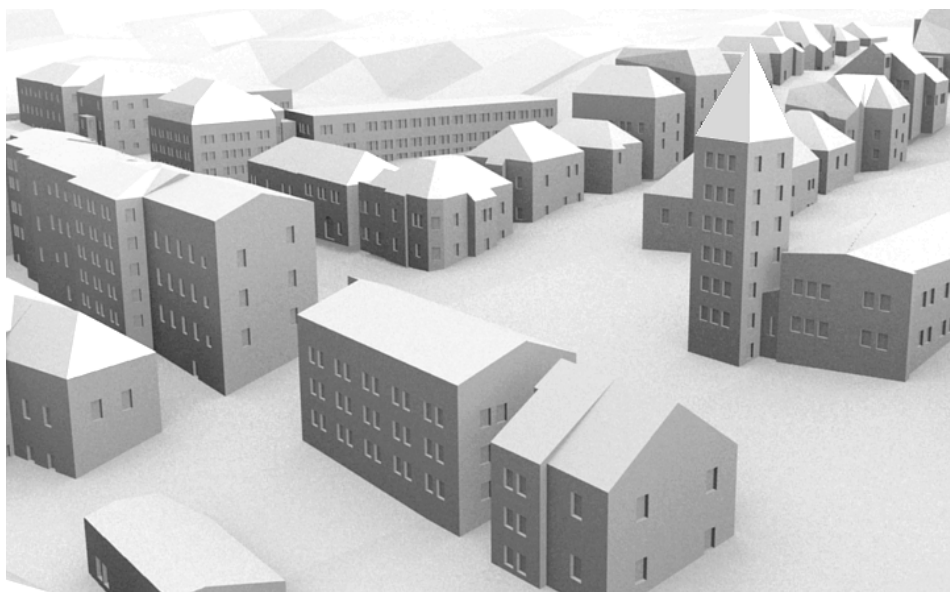


(a) 3D-Fassadenmodelle als Ergebnis grammatikbasierter Rekonstruktion



(b) Luftbildaufnahme aus Bing Maps (<http://www.bing.com/maps/>)

Abbildung 7.3: Stuttgart im Bereich Hauptstätter Straße - Charlottenstraße.



(a) 3D-Fassadenmodelle als Ergebnis grammatikbasierter Rekonstruktion



(b) Luftbildaufnahme aus Bing Maps (<http://www.bing.com/maps/>)

Abbildung 7.4: Stuttgart im Bereich Hölderlinstraße - Lessingstraße.



(a) 3D-Fassadenmodelle als Ergebnis grammatikbasierter Rekonstruktion



(b) Luftbildaufnahme aus Bing Maps (<http://www.bing.com/maps/>)

Abbildung 7.5: Stuttgart im Bereich Schillerplatz.

7.2 Bewertung prozedural generierter Fassadenstrukturen

Die Bewertung grammatikbasiert erzeugter Fassadenmodelle erfordert im Vorfeld die Definition des in diesem Zusammenhang gebrauchten Qualitätsbegriffs sowie die Bereitstellung geeigneter Metriken. Ausführliche Betrachtungen hierzu sind in Abschnitt 7.2.1 zu finden. Das dort vorgeschlagene Konzept zur Qualitätsanalyse wird in Abschnitt 7.2.2 auf konkrete Ergebnisse der Fassadenrekonstruktion angewendet.

7.2.1 Konzept zur Bewertung der Qualität

Beim Entwurf eines geeigneten Konzepts zur Bewertung der Qualität prozedural generierter Fassadenstrukturen ist entscheidend, welche Merkmale der rekonstruierten Fassade in die Evaluation miteinbezogen werden sollen. Qualitätsmetriken, die üblicherweise für die Beurteilung von LOD2-Gebäudemodellen herangezogen werden, betrachten vornehmlich geometrische, teilweise auch topologische Eigenschaften. Um dafür aussagekräftige Qualitätsbeschreibungen abzuleiten, arbeiten einige Ansätze pixelbasiert auf der Grundlage von 2D-Projektionen (Henricsson und Baltsavias, 1997; Ameri, 2000; Suveg und Vosselman, 2002; Boudet et al., 2006). Andere Verfahren führen den Vergleich mit Referenzmodellen direkt im 3D-Raum aus. So lassen sich etwa aus Voxel-Repräsentationen eine Reihe von Qualitätsmaßen berechnen, beispielsweise die aus der Klassifikation bekannten Überlassungsfehler (*engl.: commission error*) und Unterlassungsfehler (*engl.: omission error*) (McKeown et al., 2000; Schuster und Weidner, 2003; Meidow und Schuster, 2005). Sie eignen sich ebenso wie die von Freeman und Sargent (2008) berechneten polyederförmigen Fehlerkörper insbesondere für die Untersuchung des Volumens und der Randflächen von 3D-Modellen. Die Genauigkeiten einzelner Gebäudepartien lassen sich durch Abstandsmaße beschreiben, die zwischen Modell und Referenzdaten für korrespondierende Punkte (Guarnieri et al., 2004; Kaartinen et al., 2005) oder Oberflächenelemente (Akca et al., 2009) ermittelt werden. Ansätze zur Bewertung der Topologie basieren überwiegend auf visuellen Einschätzungen (Sargent et al., 2007; Durupt und Taillandier, 2006). Ragia und Förstner (1999) und Ragia und Winter (2000) schlagen explizite Metriken zur Quantifizierung topologischer Qualität vor. Diese behandeln sowohl Nachbarschaftsbeziehungen zwischen Gebäuden als auch topologische Eigenschaften einzelner Gebäudehüllen, berücksichtigen dabei jedoch ausschließlich zweidimensionale Regionen beziehungsweise Grundrisse.

Metriken, die wie die hier genannten Beispiele entweder die Positionsgenauigkeit, geometrische oder topologische Aspekte berücksichtigen, eignen sich für die Evaluation von Gebäudemodellen, die mit dem Ziel größtmöglicher geometrischer Genauigkeit generiert wurden. Den hier zu bewertenden synthetisierten Fassadenmodellen werden sie allerdings nicht gerecht. Jene sind das Ergebnis eines grammatikbasierten Rekonstruktionsverfahrens, das so konzipiert wurde, dass die resultierenden Fassadenstrukturen plausibel sind - und dies nicht nur in Fassadenbereichen mit gleichmäßiger und dichter Punktabdeckung, sondern insbesondere auch in Regionen, in denen keine oder qualitativ ungenügende Sensordaten vorliegen. Prozedural generierte Fassadenstrukturen sollen also in erster Linie realistisch sein. Fassadenstrukturen werden dann als realistisch empfunden, wenn sie zum Charakter des jeweiligen Gebäudes passen. Die Qualität synthetisierter Fassadenstrukturen definiert sich demnach nicht über die Positionsgenauigkeit einzelner Fassadenelemente, sondern darüber, wie gut das architektonische Erscheinungsbild der Fassade getroffen ist. Prinzipiell ist eine Einschätzung über einen visuellen Vergleich mit realen Bildaufnahmen möglich (siehe Abbildungen 7.3 bis 7.5). Darüber hinaus soll hier jedoch auch eine objektive Bewertung auf Basis quantitativ messbarer Kriterien vorgenommen werden. Diese objektive Bewertung soll dabei den visuellen Eindruck eines Betrachters widerspiegeln. Wie in Abschnitt 2.1 dargestellt, unterliegt die visuelle Wahrnehmung geometrischer Formen allgemeinen Prinzipien, die vom kulturellen Hintergrund des Betrachters oder von Fragen des persönlichen Geschmacks unabhängig sind. Zu den wesentlichen ebenfalls dort genannten Faktoren, die speziell die Wahrnehmung von Gebäudefassaden beeinflussen und so das Erscheinungsbild der Fassade prägen, zählen Form und Ausgestaltung der Fenster, das Verhältnis zwischen geschlossener Mauerfläche und Maueröffnungen sowie die Anordnung der Fensteröffnungen. Bei den Fensteranordnungen stechen insbesondere symmetrische Konfigurationen, Reihungen oder wiederkehrende Fenstergruppen hervor. Diese Fassadeneigenschaften sind objektiv feststellbar und eignen sich daher, um in Metriken abgebildet zu werden, über die sich die Qualität der Fassade quantifizieren lässt. Die im Folgenden vorgestellten Kriterien stellen den Versuch dar, einige dieser Merkmale

messbar zu machen. Eine vollständige Berücksichtigung sämtlicher Erscheinungsbild prägenden Faktoren ist hier nicht angestrebt. Die Metriken sind lediglich als Beispiel für ein mögliches Qualitätsmaß zu verstehen, das grundlegende Aspekte nachbildet, die bei der visuellen Wahrnehmung von Fassaden eine Rolle spielen.

Formparameter: Um die in einer Fassade auftretenden Fensterformen zu charakterisieren (Abbildung 7.6), wird der Formparameter r eingeführt, der sich aus dem durchschnittlichen Flächen-Umfang-Verhältnis aller Fenster einer Fassade ergibt. Er berechnet sich über die Formel

$$r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{4\pi A_i}{U_i^2}, \quad (7.1)$$

wobei n die Fensteranzahl, A_i die Fläche und U_i den Umfang des i -ten Fensters bezeichnen. Auch als Rundheitsmaß bekannt, drückt der Formparameter die Kompaktheit der Fensterpolygone aus. Der maximale Wert $r = 1$ wird für kreisrunde Fenster erreicht.

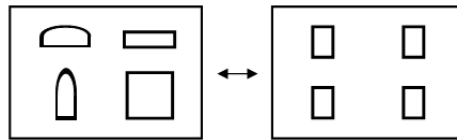


Abbildung 7.6: Beispiele für Fassaden, die sich in Art und Vielfalt der auftretenden Fenstertypen unterscheiden.

Fenstergröße: Fenster unterscheiden sich nicht nur in ihrer Form, sondern auch aufgrund ihrer Größe (Abbildung 7.7). Diese kommt im bereits vorgestellten Formparameter nicht zum Ausdruck. Die Fenstergröße g wird hier erfasst als durchschnittlicher Flächeninhalt aller Fenster:

$$g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i. \quad (7.2)$$

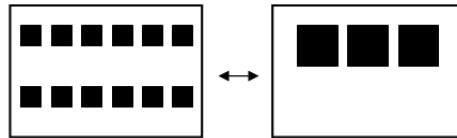


Abbildung 7.7: Beispiele für Fassaden mit unterschiedlichen Fenstergrößen bei gleicher Fensterform, gleichen Fensterabständen sowie gleichem Fensteranteil (siehe nachfolgende Kriterien).

Fensteranteil: Der Fensteranteil beschreibt den Anteil der Fensterflächen bezüglich der gesamten Fassadenfläche. Der Parameter lässt Rückschlüsse auf das Verhältnis von Mauerfläche zu Maueröffnung zu (Abbildung 7.8) und drückt damit die „Offenheit“ der Fassade aus. Der Fensteranteil a wird über die Formel

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{A}, \quad (7.3)$$

ermittelt, in der A die Fläche des Fassadenpolygons darstellt. Der Wertebereich reicht somit von $a = 0$ für vollkommen geschlossene Fassaden bis zu $a = 1$ im Fall einer Glasfassade.

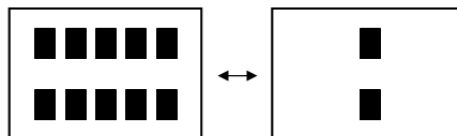


Abbildung 7.8: Beispiele für Fassaden mit deutlich unterschiedlichem Fensteranteil.

Fensterabstände: Die Aneinanderreihung von Fenstern geschieht in der Regel nicht zufällig, sondern folgt einem bestimmten Rhythmus, der durch wiederkehrende, festgelegte Abfolgen von Wand- und Fensterflächen entsteht (Abbildung 7.9). Regelmäßigkeiten und Muster werden so in den Fensterkonfigurationen sichtbar. Der zugrunde liegende Rhythmus wirkt sich auf die Häufigkeiten der horizontalen Fensterabstände aus. Auf Basis eines Histogramms ist eine Interpretation der Fensteranordnung möglich. Während eine Gleichverteilung darauf hindeutet, dass in der Fensterkonfiguration keine klar erkennbaren Strukturen oder Muster vorhanden sind, zeigen Histogramme mit deutlich ausgeprägten Maxima das Vorherrschen bestimmter Fensterabstände an, die für das betreffende Fassaden-Design charakteristisch sind.

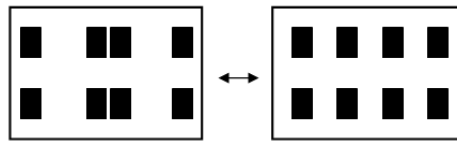


Abbildung 7.9: Beispiele für Fensteranordnungen mit unterschiedlichem Rhythmus.

Symmetrieindex: Der Symmetrieindex erfasst den Symmetriegehalt von Fensteranordnungen (Abbildung 7.10) bezüglich der vertikalen Fassadenmittellachse. Hierbei wird auf ein einfach zu interpretierendes Maß, den normierten Kreuzkorrelationskoeffizienten, zurückgegriffen. Seine Berechnung erfolgt auf Basis eines künstlich erzeugten Fassadenbildes, in dem Fensterflächen durch den Wert 1 und Wandflächen durch den Wert 0 repräsentiert sind. Der Korrelationskoeffizient, der nach Formel (5.1) für dieses Fassadenbild und dessen gespiegelter Version ermittelt wird, entspricht dem Symmetrieindex s . Ein Wert von $s = 1$ zeigt perfekte Symmetrie zur Mittellachse an; bei $s = 0$ sind keine symmetrischen Anordnungen erkennbar.

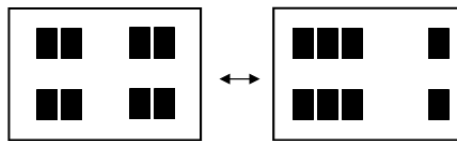


Abbildung 7.10: Beispiele für eine symmetrische und eine nicht symmetrische Fassade.

Auf der Basis solchermaßen messbarer Fassadeneigenschaften kann die Qualität eines Fassadenmodells abgeschätzt werden. Die einzelnen Kriterien können dabei je nach geplanter Anwendung der Fassadenmodelle von unterschiedlicher Wichtigkeit sein. So ist zum Beispiel für Berechnungen im Bereich der Wärmedämmung oder des Lärmschutzes ausschließlich der Fensteranteil von Bedeutung. Für die 3D-Navigation hingegen sind aus Gründen der Wiedererkennbarkeit von Gebäuden zusätzlich die Komponenten Fensterform und -anordnung wichtig. Für die hier angestrebte Bewertung eines Fassadenmodells bezüglich der Übereinstimmung seines Erscheinungsbildes mit dem des realen Gebäudes ist die Berücksichtigung sämtlicher angegebener Fassadenmerkmale sinnvoll.

In den in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen werden Abweichungen der einzelnen Fassadenparameter von der Realität für diejenigen Größen, die auf einen Wertebereich von $[0, 1]$ beziehungsweise $[-1, 1]$ normiert sind, über den Betrag ihrer Differenz d angegeben. Dies gilt für den Formparameter r , den Fensteranteil a und den Symmetrieindex s . Die Abweichung der Fenstergröße g wird als relativer Fehler e_g berechnet. Die Ähnlichkeit von Histogrammen, die jeweils die Häufigkeit auftretender Fensterabstände anzeigen, wird mit Hilfe der sogenannten „Earth Mover’s Distance“ (EMD) bewertet (Rubner et al., 1998). Es handelt sich hierbei um ein Maß, das die Distanz zwischen zwei Verteilungen über einer bestimmten Region ermittelt. Anschaulich formuliert, können die zu vergleichenden Histogramme als zwei verschiedene Erdanhäufungen interpretiert werden. Der EMD-Wert beschreibt dann die minimalen Kosten, die zur Angleichung beider Erdhaufen bei der Umschichtung entstehen. Die Kosten ergeben sich dabei aus der zu bewegenden Erdmenge, multipliziert mit der zurückzulegenden Distanz. Mathematisch stellt die Berechnung der Earth Mover’s Distance eine lineare Optimierung des in Hitchcock (1941) diskutierten Transportproblems dar. Ein EMD-Wert von 0 ergibt sich bei Gleichheit der Häufigkeitsverteilungen. Histogrammunterschiede, die auf deutlich erkennbare Abweichungen der Fensterkonfiguration zurückgehen, schlagen sich in EMD-Werten größer 1.0 nieder.

7.2.2 Auswertung und Interpretation

Im Folgenden werden die im vorigen Abschnitt beschriebenen Qualitätsmetriken exemplarisch auf ausgewählte Datensätze angewendet. Diese enthalten sowohl Gebäude mit gleichabständigen Fensteranordnungen in durchweg homogenen Fassaden (Beispiel Linden-Museum), als auch Gebäude mit komplexeren Fensterkonfigurationen (Beispiel Alte Kanzlei). Der Vergleich der Fassadenmodelle mit der Realität erfolgt dabei auf der Grundlage manueller Messungen, die in entzerrten Fassadenbildern vorgenommen werden. Erfasst werden Flächeninhalt und Umfang von Fenstern und Türen, sowie die horizontalen Abstände zwischen aufeinanderfolgenden Fassadeneinbuchtungen. Für die Berechnung des Symmetrieindex⁷ werden die Fassadenbilder binarisiert, indem Fenster- und Türbereichen der Wert 1 und Wandbereichen der Wert 0 zugewiesen wird. Die in den entzerrten Fassadenbildern durchgeführten Messungen und die daraus abgeleiteten Fassadenparameter sind mit einer Unsicherheit behaftet, die auf die begrenzte Auflösung im Bild und eventuelle Ungenauigkeiten bei der Bildverzerrung zurückzuführen ist. Hinzu kommt die Definitionsunsicherheit durch den Operateur, die unter anderem von der Bildqualität und der Pixelgröße abhängt (Kraus, 2004). Bei typischen Aufnahmeabständen im Bereich von 10 bis 50m und der hier verwendeten Kamera NIKON 2Dx (Objektiv NIKKOR 20mm) ist bei einer Pixelgröße von 5.5 μm mit einer Unsicherheit von einigen Zentimetern im Objektraum zu rechnen. Die Messungen reichen dennoch für eine erste Qualitätsabschätzung der Fassadenmodelle aus; die eigentliche Referenz stellt ohnehin die Interpretation durch den Betrachter dar.

In den Tabellen 7.1 bis 7.4 sind die Ergebnisse der Qualitätsauswertung für die Datensätze „Bürogebäude“, „Prinzenbau“, „Linden-Museum“ und „Alte Kanzlei“ aufgelistet. Die Abbildungen 7.11 und 7.12 erlauben einen visuellen Vergleich der ausgewerteten Fassadenmodelle mit der Realität. Für jedes der genannten Gebäude wurde auf der Basis einer einzelnen, datengetriebenen rekonstruierten Fassade eine individuelle Grammatik automatisch abgeleitet. Alle übrigen, noch nicht ausmodellierten Fassaden, die zum betreffenden Gebäude gehören, wurden mit Hilfe der jeweiligen Grammatik um 3D-Fassadenstrukturen angereichert. Die Fassaden, die nach dem datengetriebenen Verfahren modelliert und als Ausgangspunkt für die Grammatikinduktion verwendet wurden, werden im Weiteren als *Frontfassaden* geführt. Die grammatikbasiert rekonstruierten Gebäudeseiten sind entsprechend ihrer Ausrichtung bezeichnet. Zum Vergleich werden die Abweichungen in den einzelnen Fassadenparametern nicht nur für die rein synthetisierten Gebäudeflächen bestimmt, sondern auch für die jeweiligen Frontfassaden. Die Beispiele „Bürogebäude“ und „Prinzenbau“ dienen dazu, die Qualitätsverbesserung zu quantifizieren, die durch die grammatikgestützte Vervollständigung und Verifikation (Abschnitte 6.3 und 6.4) datengetrieben erzeugter Fassadenstrukturen erreicht werden kann. Betrachtet wird dabei jeweils die Frontfassade, einmal als fehlerhaftes Ergebnis der datengetriebenen Rekonstruktion (bezeichnet mit $Front_D$) und einmal in ihrer vervollständigten beziehungsweise verifizierten Form (bezeichnet mit $Front_V$). Anhand der Datensätze „Linden-Museum“ und „Alte Kanzlei“ wird abgeschätzt, welche Qualität für komplett synthetisierte Fassaden möglich ist.

BG	Formparameter r			Fenstergröße g			Fensteranteil a			Hz-Abst.e	Symmetrieindex s		
	Ref. _□	Modell _□	d_r	Ref. _[m²]	Mod. _[m²]	e_g	Ref. _□	Modell _□	d_a	EMD	Ref. _□	Modell _□	d_s
Front _D	0.75	0.75	<1%	1.90	2.80	48%	0.21	0.28	7%	0.12	0.74	0.52	22%
Front _V	0.75	0.75	<1%	1.90	2.04	7%	0.21	0.22	1%	0.10	0.74	0.73	1%

Tabelle 7.1: Bewertung des Datensatzes Bürogebäude (Abk.: BG).

PB	Formparameter r			Fenstergröße g			Fensteranteil a			Hz-Abst.e	Symmetrieindex s		
	Ref. _□	Modell _□	d_r	Ref. _[m²]	Mod. _[m²]	e_g	Ref. _□	Modell _□	d_a	EMD	Ref. _□	Modell _□	d_s
Front _D	0.69	0.68	1%	3.71	3.26	12%	0.21	0.17	4%	0.51	0.98	0.89	9%
Front _V	0.69	0.69	<1%	3.71	3.62	2%	0.21	0.21	<1%	0.04	0.98	0.98	<1%

Tabelle 7.2: Bewertung des Datensatzes Prinzenbau (Abk.: PB).

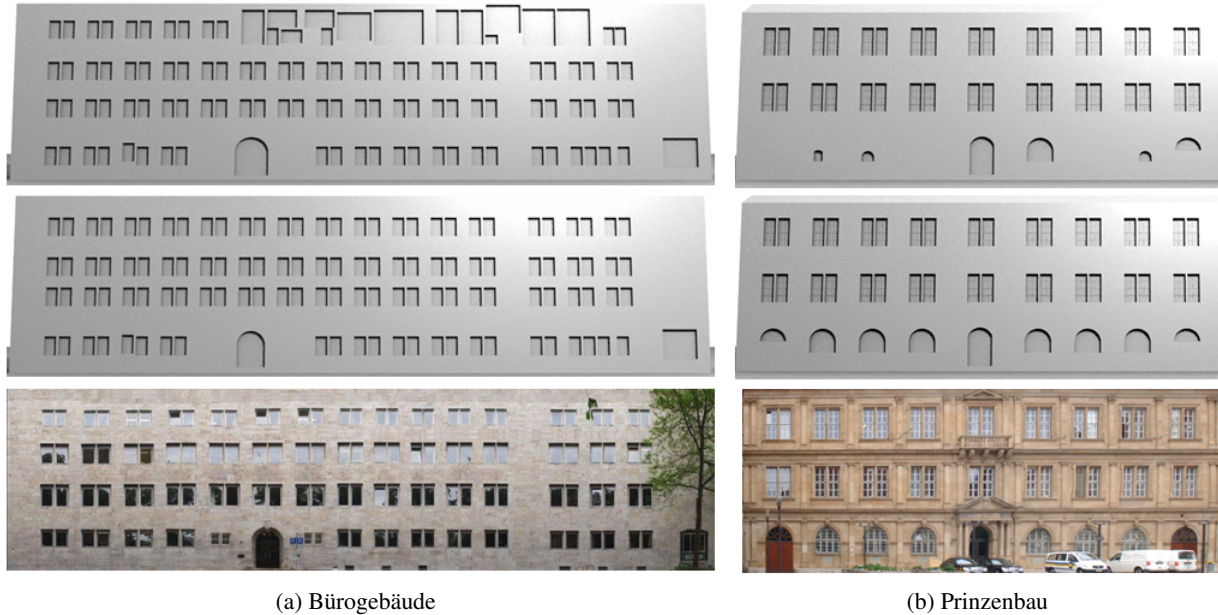
LM	Formparameter r			Fenstergröße g			Fensteranteil a			Hz-Abst.e	Symmetrieindex s		
	Ref. _□	Modell _□	d_r	Ref. _[m²]	Mod. _[m²]	e_g	Ref. _□	Modell _□	d_a	EMD	Ref. _□	Modell _□	d_s
Front	0.74	0.73	1%	4.71	4.60	2%	0.23	0.22	1%	0.07	0.94	0.96	2%
S	0.74	0.73	1%	4.63	4.54	2%	0.24	0.23	1%	0.06	0.99	0.92	7%
O	0.74	0.73	1%	4.63	4.62	<1%	0.24	0.24	<1%	0.07	0.97	0.96	1%
NO	0.73	0.72	1%	4.89	4.91	<1%	0.14	0.14	<1%	0.12	0.99	1.00	1%
NW	0.72	0.72	<1%	5.74	4.91	14%	0.27	0.22	5%	0.22	0.91	0.93	2%
∅			1%			4%			2%	0.12			3%

Tabelle 7.3: Bewertung des Datensatzes Linden-Museum (Abk.: LM).

AK	Formparameter r			Fenstergröße g			Fensteranteil a			Hz-Abst.e	Symmetrieindex s		
	Ref. _□	Modell _□	d_r	Ref. _[m²]	Mod. _[m²]	e_g	Ref. _□	Modell _□	d_a	EMD	Ref. _□	Modell _□	d_s
Front	0.67	0.69	2%	1.44	1.38	4%	0.17	0.16	1%	0.09	0.48	0.46	2%
O	0.66	0.69	3%	1.31	1.32	1%	0.15	0.15	<1%	0.26	0.85	0.56	29%
N(1)	0.67	0.70	3%	1.72	1.40	19%	0.23	0.16	7%	0.40	0.67	0.43	24%
N(2)	0.65	0.69	4%	1.45	1.42	2%	0.17	0.11	6%	0.52	0.71	0.57	14%
N(3)	0.68	0.70	2%	1.47	1.28	13%	0.18	0.11	7%	0.58	0.62	0.63	1%
S(1)	0.66	0.69	3%	1.77	1.42	19%	0.15	0.11	4%	0.24	0.63	0.57	6%
S(2)	0.68	0.70	2%	1.50	1.28	15%	0.18	0.11	7%	0.37	0.63	0.66	3%
∅			3%			12%			5%	0.40			14%

Tabelle 7.4: Bewertung des Datensatzes Alte Kanzlei (Abk.: AK).

Die in den Frontfassaden festgestellten Abweichungen von der Realität sind auf Fehlereinflüsse aus der datengetriebenen Rekonstruktion und der eingesetzten Sensorik zurückzuführen, wie in Abschnitt 4.8 beschrieben. Zusätzliche Ungenauigkeiten treten in den Datensätzen „Bürogebäude“ und „Prinzenbau“ in Gestalt fehlerhafter Fensterformen und -größen auf; einige Fenster fehlen auch ganz. Die zu groß modellierten Fenster im oberen Stockwerk des Bürogebäudes (Abbildung 7.11a) sind die Folge dessen, dass das StreetMapper-System eine in diesem Bereich nur unzureichend dichte Punktwolke liefert. Während die durchschnittliche Fensterform und die Häufigkeitsverteilung der horizontalen Fensterabstände dadurch weitgehend unbeeinflusst bleiben, machen sich die Rekonstruktionsfehler insbesondere im relativen Fehler der durchschnittlichen Fenstergröße ($e_g = 48\%$) und in der Abweichung des Symmetrieindex ($d_s = 22\%$) bemerkbar. Die Abweichung des Fensteranteils beträgt 7% . Die Qualitätsverbesserung, die durch die Begrenzung der datengetriebenen Rekonstruktion auf einen sogenannten dichten Punktebereich (Abschnitt 6.3.2) und durch die anschließende grammatikbasierte Vervollständigung der Fassade (Abschnitt 6.3.3) erzielt werden kann, lässt sich durch die folgenden Zahlenwerte belegen. Die Abweichung der Fenstergröße wird etwa um den Faktor 7 reduziert. Fehler im Fensteranteil und in der Fensteranordnung - letztere zeigen sich hier vornehmlich im Symmetrieindex - können fast vollständig beseitigt werden. Ähnliches gilt für den Prinzenbau, bei dem die datengetriebene Rekonstruktion zunächst ein fehlerhaftes Erdgeschoss ergeben hat (Abbildung 7.11b). Die Ursachen hierfür sind in Abschnitt 6.4.1 dargelegt. Es treten Abweichungen in der durchschnittlichen Fenstergröße und im Fensteranteil von 12 beziehungsweise 4% auf. Der EMD-Wert liegt mit 0.51 zwar noch deutlich unter 1, weist jedoch ebenso wie die Abweichung des Symmetrieindex von 9% bereits auf kleinere Störungen in der Fensteranordnung hin. Die mit der bildbasierten Verifikation (Abschnitt 6.4) in diesem Beispiel erreichte Qualitätsverbesserung ist nahezu maximal: Die Fassadenparameter unterscheiden sich allesamt um nicht mehr als 2% von den Referenzdaten und der EMD-Wert liegt mit 0.04 fast bei null. Die Erzeugung realistischer Fassadenstrukturen ist somit auch dann noch möglich, wenn die zur Verfügung stehenden Beobachtungsdaten lückenhaft und nicht von gleichbleibend hoher Qualität sind.



(a) Bürogebäude

(b) Prinzenbau

Abbildung 7.11: Modelle - oben aus datengetriebener Rekonstruktion, unten nach grammatikbasierter Vervollständigung beziehungsweise Verifikation - und reale Aufnahmen zweier Gebäudefronten.

Sowohl für das Linden-Museum als auch für die Alte Kanzlei sind die Abweichungen in den Frontfassaden sehr gering und beim Vergleich mit den Fassadenbildern (Abbildung 7.12) mit bloßem Auge kaum zu erkennen. Sie bewegen sich für die Parameter r , g , a und s in der Größenordnung von 1 bis 4 %, die EMD-Werte sind kleiner als 0.1. Deutlichere Qualitätsunterschiede der beiden Datensätze offenbaren sich jedoch in deren synthetisierten Fassaden. Als typischer Vertreter homogen gestalteter Gebäude zeigt das Linden-Museum kaum Variation in Fensterform und -größe und weist eine charakteristische gitterförmige Anordnung der Fassadenelemente auf (Abbildung 7.12a). Die Regelmäßigkeit der Frontfassade, die im Zuge der Grammatikableitung in Terminale und Regeln abgebildet wurde, setzt sich in den übrigen Gebäudeteilen fort. Die Fassadengrammatik des Linden-Museums ist somit bestens geeignet, um auch das Erscheinungsbild der restlichen Fassaden zu treffen. Die synthetisierten Fassaden kommen mit Abweichungen von 1 bis 2 % für r , g , a , s und EMD-Werten kleiner 0.3 der Realität sehr nahe. Größere Abweichungen in der Nordwest-Fassade (NW) sind damit zu erklären, dass dort erstmals ein Fassadenelement auftritt, das in der Frontfassade und damit in der Grammatik nicht enthalten ist. Da es sich hierbei um eine Tür mit entsprechend großer Ausdehnung handelt, macht sich die fehlerhafte Rekonstruktion insbesondere in der Fenstergröße g und dem Fensteranteil a bemerkbar. Die Abweichungen betragen $e_g = 14\%$ und $d_a = 5\%$. Aufgrund der durchweg homogenen Fassadengestaltung des Gebäudes sind derartige Fälle jedoch die Ausnahme.

Im Gegensatz zum Linden-Museum ist bei der Alten Kanzlei die Fensteranordnung der Frontfassade von Unregelmäßigkeiten geprägt (Abbildung 7.12b). Stark unterschiedliche Fensterabstände wirken einer Rasterstruktur entgegen. Einmalig auftretende Fenstergruppen im Erdgeschoss und im obersten Stockwerk verhindern eine rein spaltenweise Organisation der Fenster. Zeilenbasierte Reihungen werden im Bereich des Treppenhauses durch vertikal versetzte Fenster unterbrochen. Zusätzliche Inhomogenitäten ergeben sich durch das umfangreichere Fensterrepertoire. Je unregelmäßiger ein Gebäude gestaltet ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass in den nicht beobachteten Gebäudeflächen im Vergleich zur Frontfassade neue Fassadenstrukturen auftreten. In der Alten Kanzlei kommen insgesamt zehn verschiedene Typen von Fassadeneinbuchtungen vor. Davon sind jedoch nur vier in der Frontfassade und damit in der Grammatik repräsentiert. Daraus resultierende Rekonstruktionsfehler zeigen sich beispielsweise in den nördlichen Gebäudeteilen N(1) und N(3) sowie in der Südfassade S(2). Die neuen Fassadenelemente unterscheiden sich von denen der Frontfassade weniger durch ihre Form als vielmehr durch ihren Flächeninhalt. Die Abweichungen der Fenstergröße erreichen Werte bis zu 19 %, die des Fensteranteils bis zu 8 %. Der Formparameter differiert um maximal 4 %. Bezüglich der Fensteranordnung ergeben sich größere Abweichungen

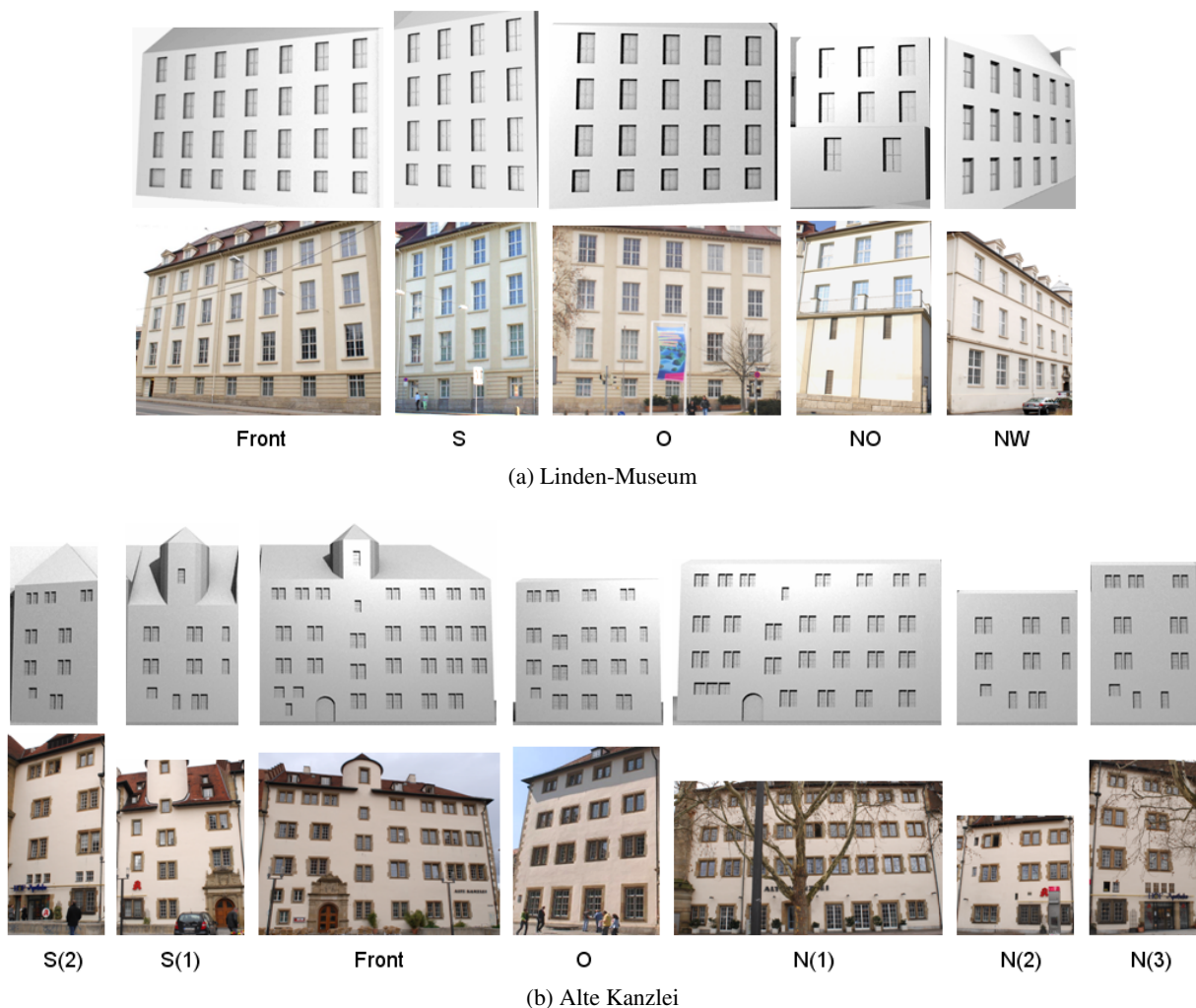


Abbildung 7.12: Modell und reale Aufnahmen von Gebäudefassaden.

dann, wenn die rekonstruierten Fassaden in der Realität entweder deutlich homogener oder inhomogener als die in der Grammatik abgebildeten Strukturen sind. Im Fall der Nordseite N(1) und der Ostfassade O drückt sich dies in Fehlern des Symmetrieindex von 24 und 29 % aus. Der für die Alte Kanzlei charakteristische Rhythmus der Fensterfolgen ist in den synthetisierten Fassaden sehr gut wiedergegeben. Der Eindruck wird auch dann nicht gestört, wenn einzelne Fassadenelemente fehlen wie zum Beispiel in der Südfassade S(2). Selbst in den Fassaden N(2) und N(3), die mit 0.52 und 0.58 die größten EMD-Werte aufweisen, ist die jeweils generierte Fensteranordnung beziehungsweise deren zugrunde liegender Rhythmus noch immer akzeptabel.

Anhand der Datensätze „Linden-Museum“ und „Alte Kanzlei“ lässt sich abschätzen, welche Qualität für prozedural erzeugte Fassadenmodelle bei unterschiedlich komplexen Gebäudestrukturen erwartet werden kann. Die hohe Qualität, die insbesondere für homogene Gebäude erreichbar ist, zeigt sich am Linden-Museum. Hier betragen die durchschnittlichen Abweichungen für die Parameter r , g , a und s 4 % und weniger; der durchschnittliche EMD-Wert liegt mit 0.12 sehr nahe bei null. Aber auch für komplexere Gebäude kann mit qualitativ guten Fassadenstrukturen gerechnet werden. So unterscheidet sich im Beispiel der Alten Kanzlei der Formparameter im Mittel um nur 3 %, der Fensteranteil um 5 %, die Fenstergröße um 12 % und der Symmetrieindex um 14 %. Der EMD-Mittelwert ist mit 0.4 immer noch deutlich kleiner als eins. Generell ist für die erzielbare Qualität der Fassadenmodelle entscheidend, in welcher Vollständigkeit die unterschiedlichen Typen von Fassadenelementen und -strukturen eines Gebäudes in der Grammatik abgebildet sind. Ein wichtiger Faktor hierfür ist der Anteil der „beobachteten Fassadenfläche“ an der Gesamtfläche aller Gebäudeseiten. Mit dem Ausdruck „beobachtete Fassadenfläche“ sind hierbei diejeni-

gen Regionen gemeint, für die 3D-Punkte in ausreichend guter Dichte für eine datengetriebene Rekonstruktion zur Verfügung standen. In Abschnitt 6.3.2 werden solche Gebiete als dichte Punktebereiche bezeichnet. Sie erstrecken sich oftmals nicht über eine komplette Fassade, sondern können aufgrund abgeschatteter Bereiche oder allgemein ungünstiger Aufnahmekonfigurationen auf kleinere Fassadenregionen begrenzt sein. Die Ausdehnung, die eine beobachtete Fassadenfläche mindestens aufweisen muss, um eine bestimmte Fassadenqualität zu erreichen, lässt sich nicht pauschal vorhersagen. Sie hängt unmittelbar von der Komplexität und Vielfalt der zu erfassenden Gebäudestrukturen ab. So beträgt beispielsweise der Anteil der beobachteten Fassadenfläche an der Gesamtfläche aller Gebäudefassaden bei der Alten Kanzlei 24 %, während dieser beim Linden-Museum mit 12 % gerade einmal halb so groß ist. Dennoch fallen bei der mit komplexeren Strukturen ausgestatteten Alten Kanzlei die durchschnittlichen Abweichungen der Fassadenparameter durchweg um ungefähr den Faktor 3 größer aus als bei den homogenen Fassaden des Linden-Museums. Dies bestätigt die Vermutung, dass für die Modellierung von Gebäuden mit überwiegend regelmäßigen Fassaden ein kleinerer Fassadenbereich beobachtet werden muss. Ebenso ist davon auszugehen, dass sich die Abschattung von Fassadenbereichen und damit die Verkleinerung des sichtbaren Fassadenrepertoires wesentlich stärker auf die Fassadenqualität komplexer Gebäude auswirkt als auf die homogener Bauwerke.

7.3 Flexibilität des Verfahrens

Ein wichtiges Kriterium, an dem sich ein Rekonstruktionsansatz messen lassen sollte, ist, wie flexibel er sich auf verschiedene Datensätze anwenden lässt. In Abschnitt 7.3.1 geht es daher um die Eignung des Verfahrens für Daten unterschiedlicher Qualität und Herkunft. Darüber hinaus wird die Anwendbarkeit auf verschiedene Stilrichtungen von Gebäuden untersucht. Die Skalierbarkeit, das heißt die Fähigkeit, nicht nur einzelne Gebäude, sondern auch ausgedehnte Gebiete geometrisch zu verfeinern, steht in Abschnitt 7.3.2 im Vordergrund.

7.3.1 Anwendbarkeit des Verfahrens

Das Verfahren zur Fassadenrekonstruktion wurde mit dem Ziel entworfen, so weit wie möglich unabhängig von der Qualität der zur Verfügung stehenden Beobachtungsdaten - hier 3D-Punktwolken - zu sein. Manuelle Interaktion sollte zudem nicht notwendig werden. Der hierfür entwickelte Ansatz der automatischen Grammatikableitung in dichten Punktebereichen beziehungsweise in den darin rekonstruierten Fassadengeometrien hoher Qualität, an den sich die grammatikbasierte Vervollständigung anschließt, wurde in Abschnitt 6.3 vorgestellt. Die Fähigkeit, auf diese Weise selbst in Fassadenregionen, in denen keine oder qualitativ ungenügende Sensordaten vorliegen, realistische Strukturen zu erzeugen, wurde in Abschnitt 7.2.2 auf der Basis objektiv messbarer Fassadenparameter belegt.

Zusätzliche Flexibilität hinsichtlich möglicher Eingabedaten ergibt sich aus dem modularen Aufbau des Verfahrens. Die datengetriebene Rekonstruktion von Gebäudefassaden liefert lediglich die Datengrundlage für die Ableitung von Wissen in Form einer Grammatik und die nachfolgende wissensbasierte Modellierung. Algorithmisch sind die Verfahrenskomponenten klar voneinander getrennt. Dies erlaubt den Austausch des datengetriebenen Rekonstruktionsteils durch andere Ansätze, die ebenfalls 3D-Fassadengeometrien bereitstellen. Insgesamt ist das Verfahren somit nicht auf Punktwolken als Eingabe beschränkt, sondern es wird offen gegenüber jeglicher Art von Beobachtungsdaten. Die wichtigste Anforderung, die die automatische Grammatikableitung an die ersatzweise eingefügte Rekonstruktionsmethode stellt, ist die semantische Vorinterpretation von Fassadeneinbuchtungen und Gebäudevorsprüngen als in sich abgeschlossene Geometrieobjekte. Diese Anforderung ist eine notwendige Voraussetzung für die Bestimmung der Terminale (Abschnitt 5.1). Selbstverständlich lassen sich auch manuell erzeugte Fassadenmodelle als Ausgangspunkt für die Ableitung einer Fassadengrammatik nutzen. Die Entwicklung leicht erlernbarer Modellierungssoftware, die es auch Laien erlaubt, schnell und einfach Fassadenstrukturen zu modellieren, schreitet rasch voran. Ein Beispiel ist die frei verfügbare Software Google SketchUp. Wenige Bedienschritte reichen bereits für die Generierung von LOD2-Gebäudemodellen aus. Mit Hilfe eines integrierten Texturierungswerkzeuges

lassen sie sich um Fassadenaufnahmen anreichern. Diese dienen als Vorlage, um die zu modellierenden Fassadenelemente wie Fenster und Türen durch Rechtecke in der Fassadenebene nachzuzeichnen. Fassadeneinbuchtungen und Vorbauten entstehen durch einfaches Hineindrücken beziehungsweise Hervorziehen der Rechtecksflächen. Die Ausweisung dieser Vertiefungen und Vorsprünge jeweils als „Gruppe“ genügt als semantische Vorinterpretation der Fassadengeometrien, so dass die erzeugten Modelle direkt für die automatische Grammatikableitung genutzt werden können. Selbst einem Nutzer ohne jegliche Vorkenntnisse über Fassadenrekonstruktion im Allgemeinen beziehungsweise über Aufbau und Verwendung von Grammatiken im Speziellen ist es somit möglich, mit geringem Aufwand die Basis für die Generierung von Fassadengrammatiken zu schaffen. Die dabei verwendete Datengrundlage in Form von Fassadenaufnahmen muss nicht unbedingt von bestehenden Gebäuden stammen. Genutzt werden können auch historische Fotos von nicht mehr existierenden Gebäuden oder Entwürfe von Bauwerken im Planungsstatus. Beispiele für aus SketchUp-Modellen abgeleitete Grammatiken und die daraus modellierten Fassaden sind in die folgenden Betrachtungen dieses Abschnitts integriert.

Ein wesentlicher Aspekt dafür, wie effizient sich das vorgestellte Verfahren einsetzen lässt, ergibt sich aus der Frage, ob und wie gut es auf unterschiedliche Stilarten von Gebäuden angewandt werden kann. Explizit kommt es darauf an, wie die in dieser Arbeit entwickelte Fassadengrammatik mit der in Abschnitt 2.8 definierten Form von Terminalen und Regeln verschiedenartige architektonische Ausprägungen zu repräsentieren in der Lage ist. Im Optimalfall werden beliebige Stilrichtungen in ihrer jeweiligen Charakteristik durch die automatische Grammatikableitung adäquat erfasst und in Terminalen und Produktionsregeln entsprechend abgebildet. Gelingt diese Abbildung, so lässt sich eine synthetisierte Fassade der Stilrichtung des zugrunde liegenden Originalgebäudes zuordnen. Je eindeutiger ein Beobachter den Stil in der Grammatik wiedererkennt, umso sicherer kann ein modelliertes Gebäude seinem Original zugewiesen werden. Für eine visuelle Einschätzung folgen in Abbildung 7.13 verschiedene Varianten von Fassadenmodellen eines Gebäudeblocks der Stuttgarter Innenstadt. Die Unterschiede rühren daher, dass die Fassadenmodellierung der ursprünglichen LOD2-Gebäudemodelle jeweils mit einer anderen - von einem stilistisch charakteristischen Gebäude abgeleiteten - Grammatik durchgeführt wurde. Die eingesetzten Grammatiken wurden allesamt automatisch aus Fassadenstrukturen extrahiert, die entweder aus dem datengetriebenen Rekonstruktionsansatz des Kapitels 4 resultieren oder manuell auf der Grundlage von Bildern in Google SketchUp erzeugt wurden. Zu letzteren zählen die Fassadengrammatiken, die für folgende Gebäude generiert wurden: die innerhalb des Projekts Stuttgart 21 geplante Bibliothek 21, das ehemalige Bosch-Areal, das Kollegiengebäude II (K II), das Informatikgebäude sowie Innenhof-Fassaden der von Friedensreich Hundertwasser gestalteten Gebäude in Plochingen. Um den Wiedererkennungseffekt hinsichtlich der verschiedenen Stilarten aus Abbildung 7.13 zu demonstrieren, enthält Abbildung 7.14 reale Aufnahmen der Gebäude, von denen sich die jeweiligen Grammatiken ableiten.

Der grundlegende Aufbau einer jeden Fassadengrammatik ist durch die vordefinierte Syntax ihrer Regeln und die besondere Interpretation von Fassadeneinbuchtungen oder Gebäudevorsprüngen als Terminalen vorgegeben und somit für alle Grammatikinstanzen identisch (Abschnitt 2.8). Unterschiede manifestieren sich in der Anzahl und Verschiedenartigkeit der Terminalen, in Hierarchiewerten von Terminalen und Strukturen sowie in eventuellen Abhängigkeiten von Regeln untereinander, die sich beispielsweise in Form hierarchischer Beziehungen in komplexen Anordnungen von Fassadenelementen niederschlagen können. Während sich zum Beispiel in der Grammatik „Prinzenbau“ wiederholt auftretende Fenstergruppierungen in hierarchisch verknüpften Strukturregeln widerspiegeln (siehe Abbildung 5.7), weist die Grammatik „Hundertwasser“ zwar eine große Menge an Instanzierungsregeln auf, von denen jedoch keine zum Typ Strukturregel zu zählen sind. Dies folgt aus dem Fehlen jeglicher Art struktureller Wiederholungen in den Hundertwasser-Fassaden. Die individuellen Ausprägungen der Fassadengrammatiken wirken sich direkt auf die synthetisierten Fassadenmodelle aus. Diese erscheinen mehr oder weniger homogen oder komplex, strukturiert oder zufällig, offen oder geschlossen usw. Eine Charakterisierung der Grammatiken aufgrund von Fassadeneigenschaften ist somit möglich. Als Ergänzung der visuellen Beurteilung dessen, wie gut sich die Modellierungsergebnisse einzelner Fassadengrammatiken unterscheiden und sich der Stilrichtung zuordnen lassen, werden die Grammatikinstanzen im Folgenden über objektiv feststellbare Fassadenmerkmale beschrieben. Hierfür werden die in Abschnitt 7.2.1 eingeführten Maße zur Quantifizierung von Fassadeneigenschaften genutzt. Es sind dies der Formparameter, die durchschnittliche Fenstergröße, der Fensteranteil, die Häufigkeitsverteilung horizontaler Fensterabstände und der Symmetrieindex. Um die Häufigkeitsverteilung der horizontalen Fensterabstände ebenso wie die übrigen Fassadenparameter über eine skalare Größe ausdrücken zu können, werden die jeweiligen

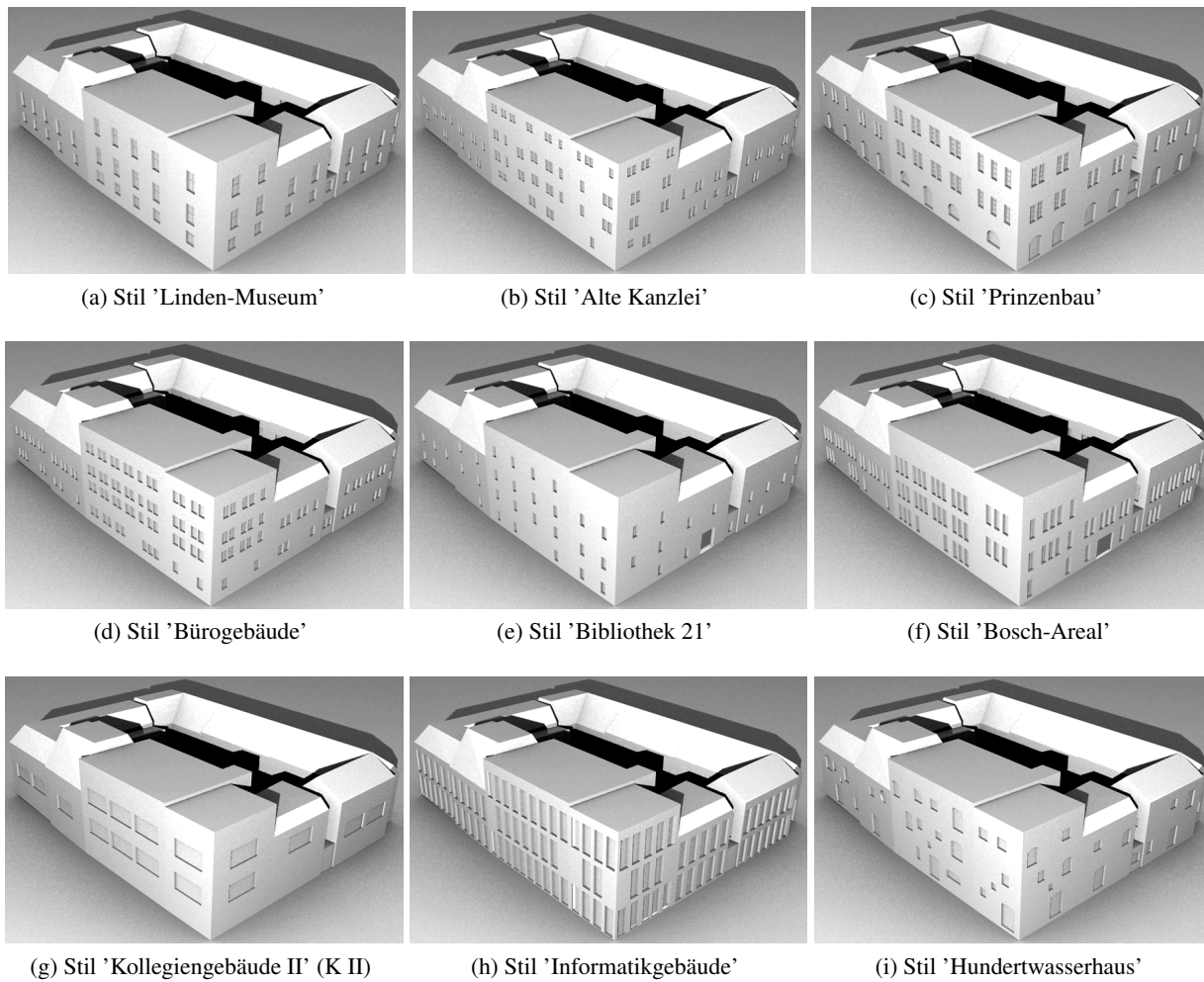


Abbildung 7.13: Gebäudeblock der Stuttgarter Innenstadt, modelliert mit neun verschiedenen Fassadengrammatiken.

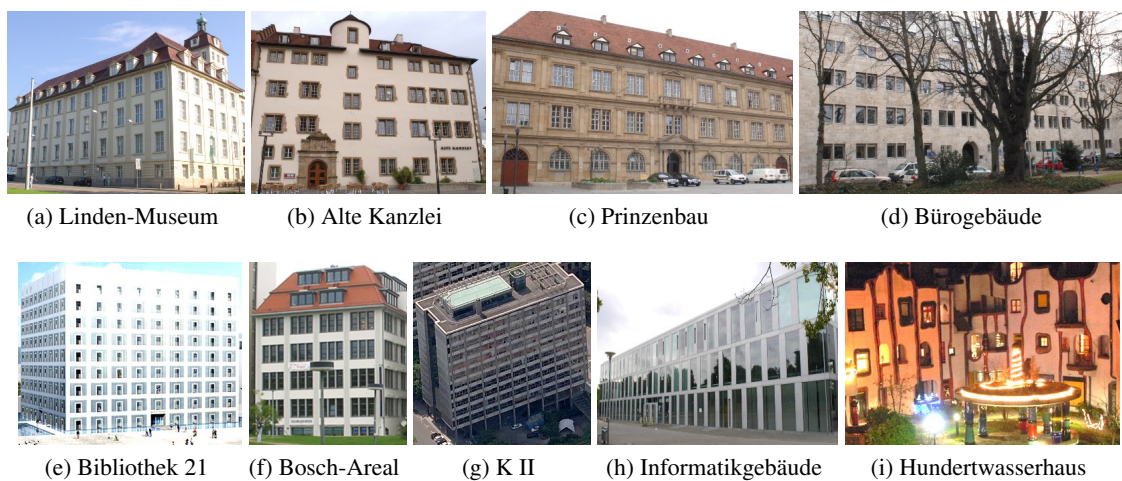


Abbildung 7.14: Gebäude, für die Fassadengrammatiken abgeleitet wurden.

Histogramme über ihren Energiewert charakterisiert. Dieser berechnet sich aus der Quadratsumme aller normierten Häufigkeiten und beschreibt die Homogenität der Fensteranordnung. Der Wertebereich liegt zwischen 0 und 1, wobei der Wert 1 größtmögliche Homogenität anzeigt. Gemeinsam spannen die Fassadenparameter einen fünfdimensionalen Merkmalsraum auf, in den sich die Fassadenmodelle und damit indirekt auch die zugrunde liegenden Fassadengrammatiken abbilden lassen. Eine Betrachtung im Merkmalsraum soll über die Ähnlichkeit beziehungsweise Trennbarkeit der durch die Grammatiken repräsentierten Stilrichtungen Aufschluss geben.

Zu diesem Zweck wurden die Grammatiken jeweils auf 16 Standardfassaden angewandt, deren Breiten zwischen 15 und 30m und Höhen zwischen 2 bis 5 Stockwerken liegen und sich damit im Bereich gängiger Größenordnungen befinden. Sämtliche Fassaden wurden bezüglich ihrer Fassadenparameter ausgewertet und in den Merkmalsraum überführt. Abbildung 7.15 zeigt die Fassaden im Merkmalsraum in verschiedenen Ansichten. Die fünf Achsen beschreiben die Fassadenparameter in der Reihenfolge Formparameter, Fenstergröße, Fensteranteil, Homogenität und Symmetrieindex. Für eine einheitliche Skalierung der Achsen ist der Parameter der Fenstergröße als relativer Wert angegeben, wobei die maximal auftretende Fenstergröße aller Fassaden die Bezugsgröße definiert. Fassaden, die mit derselben Grammatik modelliert wurden, sind in einer Farbe dargestellt. Eine Clusterbildung von Fassaden ein und derselben Grammatik ist erkennbar. Dies entspricht der visuellen Wahrnehmung eines einheitlichen Erscheinungsbildes der durch eine Fassadengrammatik erzeugten Modelle (siehe Abbildung 7.13). Je weiter die Fassaden einer Grammatik im Merkmalsraum gestreut sind, desto variabler sind die durch die jeweilige Terminal- und Regelmenge erzeugbaren Strukturen. Während beispielsweise die aus dem Prinzenbau abgeleitete Fassadengrammatik ein kompaktes Cluster geringer Ausdehnung beschreibt, nehmen die Fassaden, die aus der umfangreicheren Grammatik der Hundertwassergebäude entstanden sind, eine weitaus größere Region im Merkmalsraum ein. Cluster, die wie die Prinzenbau- und die Linden-Museum-Grammatik zwar deutlich unterscheidbare aber dennoch ähnliche Stilrichtungen verkörpern, liegen dichter zusammen als stark unterschiedliche architektonische Gestaltungsformen, wie sie beispielsweise durch die Grammatiken der Alten Kanzlei und des Kollegiengebäudes II repräsentiert werden. Insgesamt spiegelt sich die Fähigkeit, die Stilrichtung einer Fassade in ihren wesentlichen Eigenschaften zu erfassen und in einer Fassadengrammatik adäquat abzubilden, in der Trennbarkeit der einzelnen Cluster wider. Das für sämtliche Cluster- beziehungsweise Grammatik-Paare berechnete Separabilitätsmaß der Jeffries-Matusita-Distanz liegt immer über 1.999 und erreicht somit nahezu den Maximalwert von 2.0.

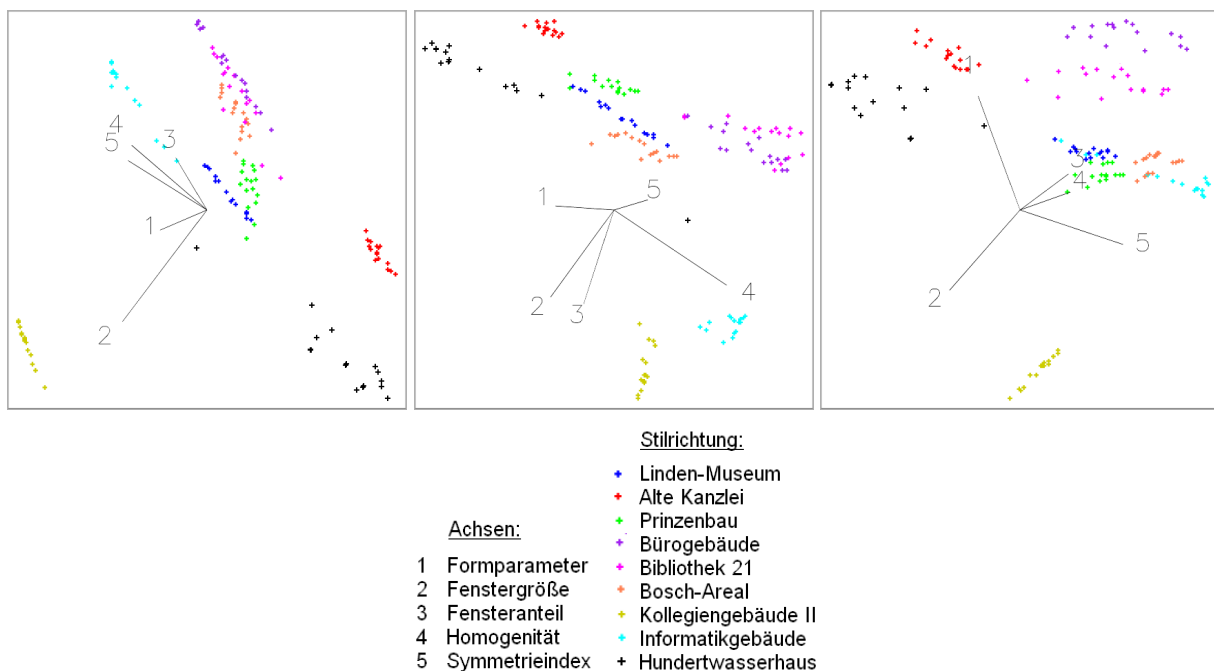


Abbildung 7.15: Verschiedene Ansichten des Merkmalsraums mit den in unterschiedlichen Stilrichtungen modellierten Fassaden.

7.3.2 Skalierbarkeit des Verfahrens

Die Skalierbarkeit des Verfahrens, also die Anwendbarkeit auf ausgedehnte bebaute Gebiete einheitlichen Architekturstils, wurde in Abschnitt 7.1 anhand verschiedener Ausschnitte der Stuttgarter Innenstadt (Abbildungen 7.3 bis 7.5) gezeigt. Für die prozedurale Generierung der Fassadenstrukturen wurden pro Beispiel jeweils eine bis drei Fassadengrammatiken ausgewählt, die dem Stil der zu modellierenden Gebäude am nächsten kommen. Generell lassen sich auf diese Weise nicht nur reale Szenen nachempfinden; auch virtuelle Umgebungen wie beispielsweise nicht mehr oder noch nicht existierende Stätten können durch entsprechende Fassadengrammatiken erzeugt werden. Unabhängig davon, ob die eingesetzte Fassadengrammatik die angestrebte Stilrichtung im gewünschten Maß widerspiegelt, entscheidet eine angemessene Mischung aus Vielfältigkeit und Einheitlichkeit der Strukturen über die Realitätsnähe der modellierten Szene. Nach Mitchell (1990) sollte eine in architektonischen Anwendungen gebrauchte Grammatik eine bestimmte Klasse von Gebäuden repräsentieren. Jede beliebige Ausprägung dieser Gebäudeklasse sollte durch die Grammatik generierbar sein. Ob eine Grammatik hierzu in der Lage ist, hängt zum einen davon ab, wie gut die Stilrichtung der betreffenden Gebäude in der Grammatik abgebildet ist; diesbezügliche Betrachtungen sind im vorhergehenden Abschnitt zu finden. Zum anderen spielt die Definition der Gebäudeklasse selbst eine Rolle. Es kommt darauf an, wie weit die Klasse gefasst ist, das heißt, welche Vielfalt möglicher Gebäudeausprägungen zugelassen wird. Mitchell (1990) weist darauf hin, dass diesbezüglich durchaus unterschiedliche Auffassungen existieren können.

Das hier vorgestellte Verfahren wurde mit dem primären Ziel entwickelt, realistische, zum betreffenden Gebäude passende Fassadenstrukturen zu erzeugen. Der Beibehaltung eines einheitlichen Stils innerhalb einer Fassadengrammatik wurde dabei höhere Priorität verliehen als der strukturellen Variabilität. Umgesetzt wurde dies vornehmlich in der Regel-Selektion (Abschnitt 6.1.2). Ausschlaggebend ist hier die Berücksichtigung von Hierarchiewerten und die Festlegung auf die Produktionsregel mit dem größten Wahrscheinlichkeitswert. Die Einheitlichkeit beziehungsweise die Vielfalt, die durch die Anwendung einer einzigen Fassadengrammatik für unterschiedlich große Fassaden erreicht werden kann, lässt sich der Ausdehnung der einzelnen Fassaden-Cluster im Merkmalsraum entnehmen (Abbildung 7.15) oder direkt aus den Beispielen der Abbildung 7.13 abschätzen. Die Fassaden erscheinen bezüglich ihres Stils einheitlich; kleine Variationen in den Fensteranordnungen der einzelnen Gebäudeseiten verhindern den Eindruck von Monotonie. Bei Fassaden mit der gleichen Ausdehnung bewirkt die besondere Konzeption der Regel-Selektion jedoch, dass jeweils identische Konfigurationen von Fassadenelementen generiert werden. Aneinanderreihungen von Fassaden gleicher Ausdehnung sind in der Realität in erster Linie bei Reihenhäusern zu finden, deren Fassadengestaltung sich üblicherweise ohnehin nicht oder nur geringfügig unterscheidet. Die eingeschränkte Variabilität bei Gebäudegruppen dieser Art wurde daher zugunsten größtmöglicher Realitätsnähe der Fassadenstrukturen in Kauf genommen. Verlagert sich die Zielstellung weg von der strikten Beibehaltung eines einheitlichen Stils hin zu einer größeren Vielfalt von Strukturen, kann die Variabilität erhöht werden, indem an folgenden Punkten angesetzt wird:

- **Regel-Selektion:** Variation in der Gestaltung gleich großer Fassaden ist möglich, wenn für die Substitution eines Nichtterminals nicht automatisch die Regel mit dem höchsten Wahrscheinlichkeitswert bevorzugt wird, sondern die Produktionsregeln entsprechend ihrer Wahrscheinlichkeiten ausgewählt werden. Die Auswirkung auf die strukturelle Variabilität hängt stark von der Komplexität der jeweiligen Grammatik ab. Für Grammatiken wie die des Linden-Museums oder der Bibliothek 21, mit denen sich ausschließlich regelmäßige, homogene Fensteranordnungen generieren lassen, sind kaum Veränderungen zu erwarten. Deutlich unterschiedliche Fassadenanordnungen ergeben sich dagegen bei Grammatiken, die sich durch eine Vielfalt an Terminalen und eine umfangreiche Regelmenge auszeichnen. Hier können auch neuartige, bezüglich der Stilrichtung des Gebäudes weniger realistische Strukturen auftreten. Abbildung 7.16 zeigt die Folge der veränderten Regel-Selektion für die Modellierung von Fassaden identischer Größe am Beispiel der Grammatik „Alte Kanzlei“. Die nun variierenden Fensterkonfigurationen sorgen für ein abwechslungsreiches Fassadenbild, enthalten jedoch bereits einzelne Strukturen, die in dieser Form in der zur Grammatikableitung verwendeten Frontfassade der Alten Kanzlei nicht beobachtet werden können. Dazu gehören zum Beispiel die Dreiergruppe in der unteren Fensterreihe der linken Fassade sowie das nun nicht mehr korrekt wiedergege-

bene Treppenhaus: Die zugehörigen Fenster, die jeweils leicht aus der Fensterzeile versetzt sind, erscheinen nicht mehr zwangsläufig übereinander und spiegeln daher den Sinnzusammenhang nicht mehr wider.

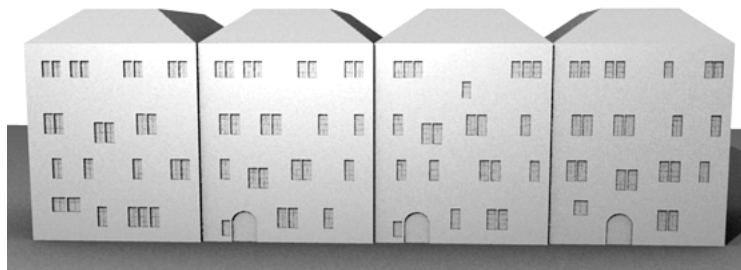


Abbildung 7.16: Anwendung der Grammatik „Alte Kanzlei“ auf gleich große Fassaden bei veränderter Regel-Selektion.

Zusätzliche Variabilität entsteht, indem in die Berechnung der Regel-Wahrscheinlichkeiten selbst eingegriffen wird. Einen Ansatzpunkt liefert die a priori Wahrscheinlichkeit, die speziell zur Steuerung der Regel-Selektion genutzt werden kann. Als Prioritätsfunktion definiert (Abschnitt 6.1.2), war sie bisher maßgeblich für die Berücksichtigung hierarchischer Abhängigkeiten von Fassadenelementen und damit für die Wahrung eines einheitlichen architektonischen Stils verantwortlich. Im Beispiel der Abbildung 7.17 wurde die Prioritätsfunktion dagegen durch eine Gleichverteilung ersetzt. Die Regeln werden dadurch insgesamt gleichrangiger. Die Anordnung der Fassadenelemente erscheint mehr und mehr zufällig; das Erscheinungsbild der Fassaden löst sich immer stärker von der Stilrichtung, die ursprünglich durch die Grammatik vorgegeben war.

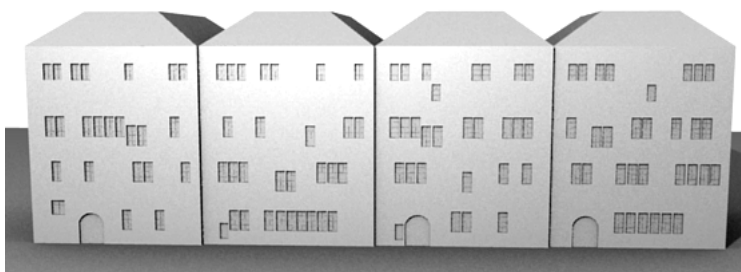


Abbildung 7.17: Anwendung der Grammatik „Alte Kanzlei“ auf gleich große Fassaden bei veränderter Regel-Selektion und Vernachlässigung hierarchischer Abhängigkeiten.

- Bedingungen für das Anwenden von Produktionsregeln:** Ob eine Produktionsregel angewendet werden kann, hängt unter anderem davon ab, ob für deren Nachfolgerelemente im aktuellen Einfügebereich auf der Fassade genügend Platz zur Verfügung steht. Über die in den jeweiligen Produktionsbedingungen enthaltene Puffervariable (Abschnitt 5.3.1) kann dabei zu einem gewissen Grad Einfluss auf die Ausnutzung des Einfügebereichs genommen werden. Ein negativer Pufferwert führt zu einer „Übersausnutzung“ der zur Verfügung stehenden Fassadenregion; das heißt, die Nachfolgerelemente benötigen mehr Platz, als eigentlich auf der Fassade vorhanden ist. Entsprechend bewirkt eine positive Puffervariable die „Unterausnutzung“ des Einfügebereichs, indem künstlich Platz auf der Fassade freigehalten wird. Resultierende Fassadenüberstände oder Lücken werden, wie in Abschnitt 6.2 beschrieben, über eine geometrische Kacheleinpassung beseitigt. Variabilität in der Kachelanordnung kann nun erzeugt werden, indem anstatt der konstanten Standardeinstellung $puffer = -1$ m jeder Fassade ein zufälliger Pufferwert zugewiesen wird. In der physikalischen Interpretation der Kachelanordnung als Federmodell bedeutet dies eine Variation der Federkonstanten. Je kleiner der Betrag der Puffervariable, desto härter die Federn beziehungsweise desto weniger elastisch die Wandkacheln. Bereits nach Anwendung der Produktionsregeln muss die Kachelanordnung die Fassade möglichst exakt ausfüllen, da die Wandkacheln in ihrer Ausdehnung nur geringfügig veränderbar sind. Ein

großer Pufferbetrag hingegen steht für weiche Federn beziehungsweise eine hohe Elastizität der Wandkacheln, so dass durch Stauchen und Dehnen der Wandkacheln auch größere Fassadenüberstände oder Lücken ausgeglichen werden können. Die Variabilität, die durch das Verändern der Puffervariable für Fassaden gleicher Größe möglich ist, ist unabhängig von der Komplexität der jeweiligen Grammatik, fällt jedoch eher gering aus. Sie beschränkt sich auf die Anzahl der modellierten Fassadenelemente. Dafür werden allerdings auch keine unrealistischen, den Stil des Gebäudes störenden Strukturen erzeugt. Abbildung 7.18 zeigt das Ergebnis einer Fassadenmodellierung, bei der für jede Fassade die Puffervariable zufällig mit einem Wert aus $[-0.3 \cdot \text{Fassadenbreite}, 0.3 \cdot \text{Fassadenbreite}]$ belegt wurde. Die verwendete Grammatik entstammt dem Gebäude „Bosch-Areal“.

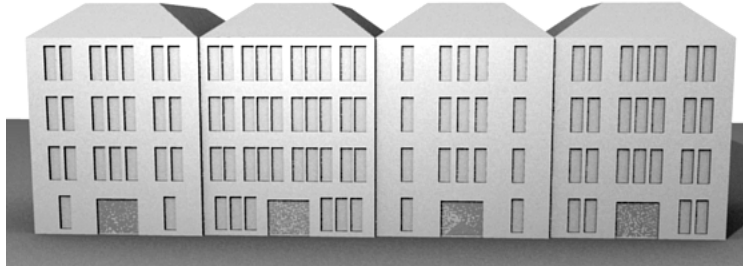


Abbildung 7.18: Anwendung der Grammatik „Bosch-Areal“ auf gleich große Fassaden mit variierender Puffervariable.

- **Leserichtung des Fassadenstrings:** Eine einfache Möglichkeit, Variation zu erzeugen, die ebenfalls die Stilrichtung unverändert lässt, ist die zufällige Festsetzung der Leserichtung des Fassadenstrings. Eine Umkehrung der üblichen Leserichtung von links nach rechts entspricht auf geometrischer Ebene einer Spiegelung der Fassade an ihrer vertikalen Mittelachse. Die Wirkung dieser Maßnahme hängt vom Symmetriegehalt der Grammatiken ab. Während für stark unsymmetrische Fassadenanordnungen signifikante Unterschiede erzielt werden können, bleiben symmetrische Konfigurationen unbeeinflusst.
- **Anzahl der Grammatiken:** Die Fassadenrekonstruktion muss nicht auf die Verwendung einer einzigen Grammatik beschränkt sein. Die Vielfältigkeit von Strukturen nimmt automatisch zu, wenn mehrere Fassadengrammatiken in den Modellierungsprozess einbezogen werden, wobei auf eine Fassade jeweils eine Grammatik angewendet wird. Unrealistische Strukturen entstehen dadurch nicht. Wie einheitlich oder verschiedenartig die Fassadenmodelle hinsichtlich ihres Erscheinungsbilds sind, hängt unmittelbar von der Ähnlichkeit der zugrunde liegenden Grammatiken ab. Im Beispiel der Abbildung 7.19 wurden mit den für die Bibliothek 21 und das Wohngebäude aus Abschnitt 6.3.3 abgeleiteten Regelsystemen zwei einander ähnliche Fassadengrammatiken ausgewählt. Die Zuweisung der Grammatiken zu einer Fassade erfolgte zufällig. Darüber hinaus wurde, wie in der zweiten und dritten oben geschilderten Maßnahme beschrieben, auf die Bedingungen der Produktionsregeln und die Leserichtung eingewirkt. Die Fassadenmodelle zeigen Unterschiede, ohne sich stilistisch zu widersprechen.

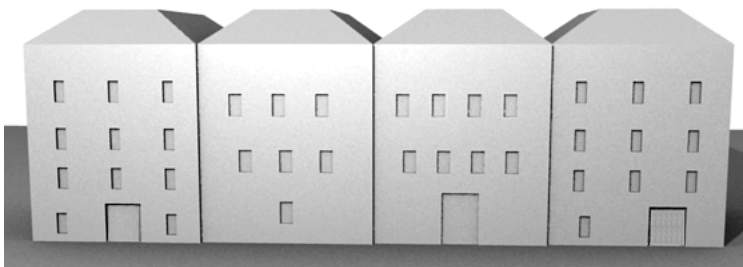


Abbildung 7.19: Anwendung zweier stilistisch ähnlicher Grammatiken auf gleich große Fassaden.

7.4 Grenzen des Verfahrens und mögliche Erweiterungen

Die Vorteile des Verfahrens wurden bereits in den vorigen Abschnitten deutlich. Hervorzuheben ist die Robustheit der Fassadenrekonstruktion gegenüber Beobachtungsdaten heterogener Qualität. Abnehmende Punktdichten oder gänzlich unbeobachtete Fassadenbereiche können durch die Anwendung von Fassadengrammatiken überbrückt werden. Ein Qualitätsverlust im Erscheinungsbild der resultierenden Fassadenmodelle wird erst dann erkennbar, wenn die zu ergänzenden Fassadenelemente in der Grammatik nicht enthalten sind. Bei überwiegend homogen gestalteten Gebäudeseiten und Fassaden mit wiederkehrenden Strukturen, wie sie in der Realität häufig zu finden sind, ist dies jedoch selten der Fall. Ein weiterer zentraler Vorteil ergibt sich aus der speziellen Definition der Fassadengrammatik. Diese ist nicht wie bei den formalen Grammatiken vieler anderer Ansätze auf die Erfassung und Wiedergabe rasterförmiger Fensteranordnungen ausgelegt (Aliaga et al., 2007; Hohmann et al., 2009; Müller et al., 2007; Ripperda, 2008b), sondern sie ermöglicht ebenso die Darstellung von höchst unregelmäßigen Konfigurationen, wie sie beispielsweise bei Hundertwasser-Fassaden üblich sind. Wie in Abschnitt 7.3.1 gezeigt, können auf diese Weise sehr unterschiedliche Gebäudestile nachempfunden werden.

Probleme in der Repräsentation von Stilrichtungen treten auf, wenn die zur Grammatikableitung genutzte Fassadenfläche keinen repräsentativen Ausschnitt der Gebäudecharakteristik bildet. Homogen gestaltete Bauwerke sind davon weniger betroffen als Gebäude, die sich durch eine große strukturelle Vielfalt und eher unregelmäßige Fensteranordnungen auszeichnen. Tücken bergen hier beispielsweise Fälle, bei denen lediglich sehr schmale Giebelseiten mit einer geringen Anzahl von Fassadenelementen für die Bestimmung der Grammatiken zur Verfügung stehen. Die resultierenden Terminal- und Regelmengen fallen entsprechend klein aus. Werden sie für die Synthetisierung breiter Fassaden genutzt, kommt es zu einer Vervielfältigung der immer gleichen Elemente; die Fassade erscheint monoton. Als unpassend wird dies vor allem dann empfunden, wenn der eigentlich darzustellende Stil von unregelmäßigen Elementen geprägt ist.

Das Verfahren stößt außerdem dann an Grenzen, wenn Gebäude wie etwa in der Stuttgarter Weißenhofsiedlung Fenster- oder Türelemente enthalten, die von ihrem ursprünglichen Zweck losgelöst sind und nur noch künstlerisch-ästhetischen Anforderungen genügen. Gemeint sind zum Beispiel Fenster, die ins Leere führen (Abbildung 7.20a und b) oder ums Eck gehen (Abbildung 7.20c). Entsprechende Abfolgen von Wand- und Fensterbereichen beziehungsweise die zugrunde liegenden Fassadenstrings stellen keine gültigen Wörter bezüglich der Syntax der Fassadengrammatiken dar und können somit nicht erzeugt werden.

Weitere Beschränkungen gehen von der Repräsentation der zu verfeinernden groben Gebäudemodelle selbst aus. So ist beispielsweise die Modellierung gebogener Fassaden (Abbildung 7.20d) nicht möglich. Schwierigkeiten können zudem bei stark fragmentierten Gebäudeseiten auftreten, die in sehr viele einzelne Flächen unterteilt sind (Abbildung 7.20e). Dadurch dass jedes einzelne Segment getrennt modelliert wird, werden größere, flächenübergreifende strukturelle Zusammenhänge oder die exakte zeilen- oder spaltenweise Ausrichtung von Fassadenelementen unterschiedlicher Fassadenpolygone nicht realisiert.

Bislang ist die Modellierung von Fassadenstrukturen mit Hilfe von Fassadengrammatiken auf Fenster, Türen und Vorbauten beschränkt. Der Grund hierfür ist die Ausrichtung der Grammatiken auf die Eigenschaften der Fassadenmodelle, die aus dem datengetriebenen Ansatz des Kapitels 4 hervorgehen. Bei der Rekonstruktion aus Punktwolken wurde bewusst der Fokus auf semantisch bedeutsame Fassadenelemente gelegt, die nicht nur für Visualisierungen, sondern auch für zahlreiche andere Anwendungen wie zum Beispiel architektonische Planungen, energetische Abschätzungen oder die Fußgängernavigation von Bedeutung sind. Der Detailgrad, der dabei für die zu rekonstruierenden Fassadenelemente erreicht werden kann, hängt von der Punktwolkendichte und der Auflösung der optional einsetzbaren Fassadenbilder ab. Vorbauten und Fassadeneinbuchtungen in Form von Fenstern und Türen werden senkrecht zur Fassadenebene als 2.5D-Geometrieobjekte modelliert und in der Grammatik als Terminale abgebildet. Möglich wären Erweiterungen der Fassadengrammatik über das bisher Dargestellte hinaus. Der Reichtum an geometrischen Details prozedural erzeugter Fassadenmodelle ließe sich beispielsweise durch die Aufnahme reliefartiger Verzierungselemente deutlich erhöhen. Speziell für die grammatikbasierte Modellierung geeignet sind musterbildende Strukturen wie etwa „bewegtes“ Mauerwerk oder bildhafte Texturen. Ansätze, die sich mit synthetischen Texturen beschäftigen, finden sich unter anderem bei Coors (2008) und Bauer et al. (2008). Von kontinuier-

licher Wiederholung geprägt sind auch Treppen oder Säulenarkaden, die sich deshalb ebenso sehr gut durch Regeln beschreiben lassen. Schmittwilken et al. (2006) zeigt dies bereits anhand von Treppen. Auch der Detailgrad von Dächern kann durch eine entsprechende Vorgehensweise gesteigert werden. Denkbar ist etwa die Berücksichtigung von Dachgauben oder Dachfenstern in der Terminalmenge, die sich durch Anwendung passender Regeln auf den Dachflächen platzieren lassen.

Zusätzliche Erweiterungsmöglichkeiten ergeben sich hinsichtlich des Algorithmus. Einen Ansatzpunkt bildet zum Beispiel die Strategie, die der grammatikbasierten Vervollständigung zugrunde liegt. Bislang wird die Grammatikableitung auf solche Fassadenbereiche beschränkt, für welche 3D-Punktwolken mit ausreichend hoher Punktdichte zur Verfügung stehen. Vorstellbar ist nun, die scharfe Segmentierung der Fassaden in genutzte und nicht genutzte Bereiche durch die Einführung unscharfer Regionen zu ersetzen. Dadurch sollen möglichst wenig Beobachtungsdaten unberücksichtigt bleiben. Realisiert werden könnte dies über einen iterativen Ansatz, der die zunächst scharf abgegrenzten Bereiche hoher Punktdichte sukzessive in Gebiete abnehmender Punktdichten ausdehnt. Die Grammatik würde wie bisher zunächst aus den sicheren Fassadenregionen abgeleitet und für die Vervollständigung der übrigen Fassadenpartien verwendet werden. In jeder nachfolgenden Iterationsstufe wird das Kriterium, das den dichten Punktebereich festlegt, gelockert, so dass dieser schrittweise anwächst. Die synthetisierten Strukturen, die sich innerhalb dieser erweiterten Fassadenregion befinden, werden gegen die beobachteten 3D-Punkte getestet. Bei Widersprüchen wie etwa dem Vorliegen von 3D-Punkten in synthetisierten Fenstern werden die betreffenden Elemente verworfen und eine neue Grammatikableitung auf Basis der modifizierten Fassadenstrukturen im erweiterten Fassadenbereich wird angestoßen. Fehlende Punkte in Wandbereichen stellen keinen Widerspruch dar. Die Iteration wird beendet, wenn keine Konflikte zwischen Modell und Beobachtungsdaten mehr auftreten.

Wie in Abschnitt 7.3.2 erwähnt, kann bei der prozeduralen Fassadenmodellierung größerer Szenen die Verwendung mehrerer Grammatiken sinnvoll sein. Die Auswahl einer geeigneten Grammatik aus einer Bibliothek von Fassadengrammatiken bietet hierbei Potenzial für weitere Entwicklungen. So könnten beispielsweise semantische und geometrische Eigenschaften der zu verfeinernden LOD2-Gebäudemodelle einbezogen werden. Nutzungsart, Baujahr, Bebauungsdichte, Gebäudehöhe, Dachform und Größe der Fassadenflächen geben einen Hinweis auf die Stilrichtung des Gebäudes. Zudem könnten Gebäudenachbarschaften berücksichtigt werden, um Stilbrüche zu vermeiden oder geometrische Anpassungen für direkt aneinander grenzende Fassaden vorzunehmen.

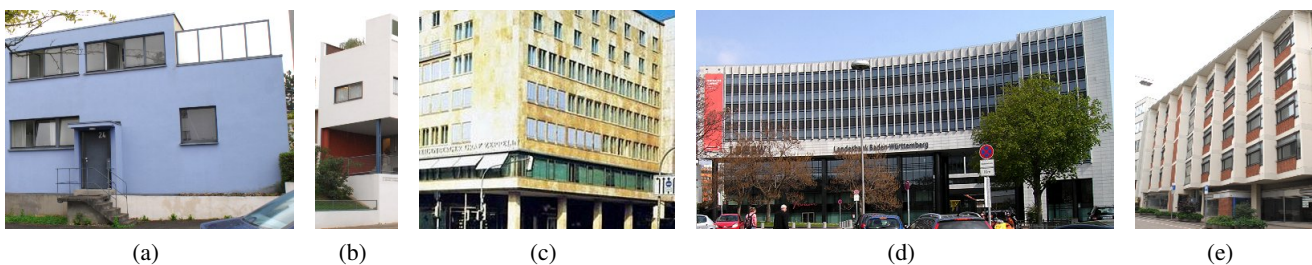


Abbildung 7.20: Beispiele für Fassaden, deren Modellierung nach dem vorgestellten Verfahren zu Problemen führt: Weißenhofsiedlung Haus 28-30 (a), Weißenhofsiedlung Haus 14/15 (b), Zeppelin-Bau (c), Landesbank Baden-Württemberg (d), Kronenstraße 36 (e).

8 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde ein vollautomatisches Verfahren zur Fassadenrekonstruktion entwickelt, das abhängig von der Qualität der zur Verfügung stehenden Beobachtungsdaten unterschiedliche Strategien für die Erzeugung möglichst realistischer Fassadenstrukturen bereithält. In Fassadenbereichen, in denen qualitativ gute Sensordaten vorliegen, kommt eine datengetriebene Komponente zum Einsatz. Sie nutzt das Prinzip der Zellerlegung, um bestehende grobe Gebäudemodelle durch Fassadeneinbuchtungen oder Vorbauten zu verfeinern. Die hierzu notwendige Strukturinformation wird aus terrestrischen LiDAR-Punktwolken extrahiert. Optional können Fassadenbilder in den Rekonstruktionsprozess einbezogen werden, um den Detailgrad der modellierten Strukturen weiter zu erhöhen. Für die im Vorfeld durchzuführende Registrierung und Georeferenzierung der Datensätze wurde ein ebenfalls vollautomatisches Verfahren vorgeschlagen und demonstriert. Mit Hilfe des datengetriebenen Ansatzes lassen sich Fassadenelemente zuverlässig rekonstruieren, solange deren Ausdehnung und die Dichte der LiDAR-Punkte in einem angemessenen Verhältnis stehen. Daraus resultierende Fassadenmodelle enthalten implizit Modellwissen, das für die Generierung von Fassadenstrukturen in den Bereichen genutzt werden kann, in denen die Qualität der verfügbaren Sensordaten für eine sichere Rekonstruktion nicht ausreicht. Dieses Wissen formal auszudrücken, gelingt mit der Einführung des Konzepts der Fassadengrammatik. Es wurde ein Verfahren vorgestellt, mit dem individuelle Instanzen von Fassadengrammatiken aus bereits rekonstruierten Fassadenstrukturen automatisch abgeleitet werden können. Wesentliche Schritte sind hierbei die Bestimmung elementarer Fassadeneinheiten und deren Zusammenhänge sowie die Abbildung der strukturellen Beziehungen in Regeln. Das Ergebnis eines solchen Ableitungsprozesses ist ein Regelsystem, dessen Anwendung zu Fassadenstrukturen im Stil des beobachteten Gebäudes führt. Für eine objektive Bewertung grammatikbasiert erzeugter Fassadenmodelle wurden Qualitätsmetriken eingeführt, die sich an Grundprinzipien der Wahrnehmung von Architektur orientieren.

Die geforderte Robustheit gegenüber unvollständigen und qualitativ ungenügenden Sensordaten erreicht die Fassadenrekonstruktion durch die Kombination aus datengetriebenen und wissensbasierten Methoden. Abnehmende Punktdichten oder gänzlich unbeobachtete Fassadenbereiche können durch den Einsatz von Fassadengrammatiken kompensiert werden. Da die meisten Gebäude homogen gestaltet sind, reicht ein geringer Anteil der Fassade zur Extraktion typischer Strukturen. Nur wenn ein zu ergänzendes Element in der Grammatik nicht enthalten ist, wird das Erscheinungsbild der erzeugten Fassadenmodelle in seiner Realitätsnähe beeinträchtigt. Charakteristisch für das vorgestellte Verfahren ist, dass es in allen Einzelschritten vollautomatisch abläuft. Dies schließt auch die Ableitung der Fassadengrammatiken mit ein. Im Unterschied zu anderen Ansätzen erübrigt sich auf diese Weise die manuelle Interaktion. Die spezielle Definition der Fassadengrammatik ist nicht auf die Erfassung und Wiedergabe rasterförmiger Fensteranordnungen beschränkt, sondern sie erlaubt auch die Darstellung unregelmäßiger Konfigurationen, so dass Gebäudestile unterschiedlicher Art nachempfunden werden können. Dem Wiedererkennungseffekt wird durch die geometrische Rekonstruktion auch ohne den Einsatz von Fassadentexturen Genüge getan. Nichtsdestotrotz ist die Integration von Texturen möglich. Zum Beispiel zeigt Pu (2010), wie reale Fassadenaufnahmen für die Texturierung detailreicher Fassadengeometrien genutzt werden können. Denkbar ist auch die Verwendung synthetischer Texturen, die selbst das Ergebnis prozeduraler Methoden sind (Coors, 2008; Bauer et al., 2008) und somit als zusätzliche Komponente der Fassadengrammatik berücksichtigt werden könnten.

Das vorgestellte Verfahren zur Fassadenrekonstruktion liefert einen Beitrag zu voll interpretierten detaillierten 3D-Stadtmodellen. Die Anforderungen, die an ein 3D-Stadtmodell gestellt werden, sind vielfältiger Natur und hängen sehr stark von der Anwendung ab. So ist etwa im Tourismusbereich, in der Unterhaltungsindustrie oder bei Bürgerbeteiligungen ein hoher Grad an Fotorealismus wünschenswert. Geht es zum Beispiel darum, einer breiten Öffentlichkeit einen wirklichkeitsnahen Eindruck von einer geplanten Umgebung zu vermitteln, macht sich die Qualität der 3D-Visualisierung an der Ähnlichkeit des virtuellen Stadtmodells und der schließlich in die Realität

umgesetzten Planung fest. Der hier geforderte Fotorealismus ist im Übrigen nicht auf die Gebäude beschränkt, sondern erstreckt sich gleichermaßen auf Elemente der Stadtmöblierung wie Bäume, Verkehrsschilder oder Parkbänke und reicht bis zur Simulation aktueller Beleuchtungsverhältnisse und Wetterbedingungen. Demgegenüber stehen Anwendungen, die 3D-Stadtmodelle als Grundlage analytischer Berechnungen und explorativer Untersuchungen benötigen. Rein visuelle Details wie etwa Grauwertinformationen sind hier nebensächlich wenn nicht sogar hinderlich. Stattdessen tritt die geometrische Repräsentation der Gebäudemodelle in den Vordergrund. Diese erhält ihre Bedeutung nicht allein aus dem Wissen über Ausdehnung und Position einzelner Gebäudekomponenten. Sie dient zugleich als Medium für ortsbezogene semantische Informationen, die sich in Form von Attributen mit einzelnen Objektgeometrien verknüpfen lassen.

Angesichts der Datenflut, die durch ständig neue Aufnahmen in bewohnten Gebieten entsteht, gilt es einen Aspekt besonders zu berücksichtigen: die Wahrung der Privatsphäre der Bewohner. Das große Konfliktpotenzial, das beispielsweise in der für Google Street View durchgeführten flächendeckenden Erfassung von Panoramabildern auf Straßenebene steckt, zeigt sich darin, dass die in Deutschland gesammelten Daten noch immer nicht der Öffentlichkeit zugänglich sind. Strenge Auflagen wie das Unkenntlichmachen von Gesichtern und Kfz-Kennzeichen müssen erst aufwendig umgesetzt werden. Ein noch komplexeres und bislang ungelöstes Problem erwächst aus den relativ hoch aufgelösten Fassadenfotos, die unter Umständen in Fenster- oder Türbereichen sogar Einblick in das Gebäudeinnere gewähren. Unter dem Gesichtspunkt der Privatheit sind allzu fotorealistische Darstellungen also eher nachteilig. Einen sinnvollen Mittelweg zwischen Realitätsnähe und der notwendigen Abstraktion zu finden, stellt für aktuelle wie zukünftige Entwicklungen im Bereich der Gebäuderekonstruktion eine Herausforderung dar. Ein möglicher Lösungsansatz ist die Anwendung der hier vorgestellten Fassadengrammatiken. Die prozedurale Generierung von Fassadenstrukturen trägt zum Schutz der Privatheit bei, indem sie bei der Rekonstruktion wie eine Art Filter wirkt. Fenster und Türen erscheinen allenfalls zufällig an ihren exakten Positionen auf der Fassade, geben aufgrund ihrer für das Gebäude charakteristischen Form und Anordnung die Wirklichkeit aber dennoch in realistischer Art und Weise wieder. Der Grad der Realitätsnähe kann zudem vom Nutzer über Steuerungsparameter beeinflusst werden, die sich auf die Selektion beziehungsweise Anwendung der Grammatikregeln auswirken.

Der Übergang von detaillierten Darstellungen der Gebäudeaußenhüllen zu Innenraummodellen ist nur ein weiterer logischer Schritt auf dem Weg zu voll interpretierten 3D-Stadtmodellen. Die stetige geometrische und semantische Verfeinerung der Gebäuderepräsentationen wird letztendlich nicht an der Außenhülle der Gebäude haltmachen. Ansätze auf dem Gebiet „Simultaneous Localization and Mapping“ wie in jüngster Zeit der von Jenke et al. (2009) oder die Arbeiten von Furukawa et al. (2009) und Budroni und Böhm (2009) gehen bereits in diese Richtung; als vermaschte, teils texturierte Oberflächenmodelle oder rein geometrische CAD-Modelle besitzen sie aber keine semantischen Informationen, so dass hier noch Raum für Entwicklung bleibt. Interesse an präzisen, mit Semantik versehenen 3D-Innenraummodellen besteht unter anderem vonseiten öffentlicher Einrichtungen, die sich mit Aufgaben wie dem Katastrophenschutz, der Gefährdungsabschätzung oder der Planung von Fluchtwegen beschäftigen. Weitere Einsatzmöglichkeiten finden sich etwa im Bereich des Facility Managements und des Immobilienmarkts. Die automatische Rekonstruktion von 3D-Innenräumen stellt an die Robustheit der jeweiligen Verfahren verschärfte Anforderungen, insbesondere dann, wenn anstelle von Messungen aus hoch spezialisierten Sensoren nutzergenerierte Daten verwendet werden. Um wie bei der Fassadenmodellierung auch hier eine stabile, von der Qualität der Eingangsdaten weitestgehend unabhängige Rekonstruktion zu ermöglichen, ist die Integration von Modellwissen unumgänglich. Regelbasierte Systeme ähnlich der in dieser Arbeit vorgestellten Fassadengrammatik bieten sich an. Erweiterungen werden allerdings notwendig, um die im Vergleich zu Außenfassaden wesentlich komplexere Gliederung von Innenbereichen - gemeint ist hier neben dem Aufbau einzelner Räume auch deren Anordnung innerhalb des Gebäudes - entsprechend abbilden zu können. Während beispielsweise ein Stockwerk als Teil einer Außenfassade eine lineare Abfolge von Fassadenelementen darstellt und somit eindimensional über ein Wort der Grammatik beschrieben werden kann, besitzt dasselbe Stockwerk als Komponente des Innenraums eine mehrdimensionale Topologie bezüglich seiner Raumanordnung. Eine lineare Beschreibung in Form von Zeichenketten ist hier nicht möglich. Eine denkbare Lösung des Problems ist die Einbettung der Grammatikkomponenten in eine graphenorientierte Struktur. Formal kann dies über eine sogenannte Graphgrammatik realisiert werden. Um für Anwendungen wie Navigationsaufgaben einen kontinuierlichen Übergang von Außen- zu Innenraummodellen zu schaffen, müssen die jeweiligen Regelsysteme über Konnektoren miteinander verknüpft sein. Es handelt sich

hierbei um Gebäudekomponenten beziehungsweise -anordnungen, die in beiden Repräsentationsformen auftreten und somit als Bindeglied zwischen den Regelsystemen dienen. Beispiele sind Eingangstüren, einzelne Fenster oder auch ganze Fensterreihen.

Mit der wachsenden Komplexität der Stadtmodelle wird es auch immer schwieriger, diese aktuell und konsistent zu halten. Das gilt vor allem dann, wenn die Inhalte nicht mehr von einigen wenigen Institutionen erzeugt und bereitgestellt werden, sondern von einzelnen Nutzern oder ganzen Netzwerken von Freiwilligen generiert und nach dem Wiki-Prinzip der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden. Hinsichtlich einer gesicherten Qualität von Geodaten rücken neue, bislang ungelöste Problemfelder ins Blickfeld: die Definition eines geeigneten Qualitätsmaßes für 3D-Gebäudemodelle, das sowohl geometrische als auch topologische und semantische Aspekte umfasst; Konzepte zur Qualitätsbewertung, wobei zusätzlich zu objektiv ablaufenden Verfahren auch subjektive Einschätzungen durch den Nutzer berücksichtigt werden können; der Umgang mit Mehrfachrepräsentationen von 3D-Geodaten; das Erkennen und Beseitigen von Inkonsistenzen etc.

Dem Streben nach immer detaillierteren 3D-Modellen stehen Entwicklungen gegenüber, die eine explizite 3D-Rekonstruktion von Objektszenen zugunsten einer einfachen und schnellen Visualisierung bewusst umgehen. Im Bereich des Bildrenderings existiert beispielsweise mit dem „Point Splatting“ ein Verfahren, das auf der Basis von 3D-Punktwolken die Objektszene durch diskrete Oberflächenelemente, sogenannte Surfels (*engl.: surface elements*), repräsentiert (Pfister et al., 2000). Um die Lücken zwischen benachbarten Punkten zu füllen, erhält jeder Punkt senkrecht zum Normalenvektor die Ausdehnung einer flachen Scheibe, wobei der Radius gerade so groß ist, dass sich benachbarte Scheiben überlappen und damit der Eindruck einer geschlossenen Objektoberfläche entsteht. Die hierzu notwendigen Berechnungen lassen sich effizient und in beinahe linearer Laufzeit durchführen. Andere Ansätze in der Computergraphik folgen dem aktuellen Trend, auf 3D-Daten ganz zu verzichten und stattdessen virtuelle 3D-Ansichten allein auf der Grundlage von 2D-Bildern zu erzeugen. Ein prominentes Beispiel ist die Software Photosynth von Microsoft Live Labs. Eine Vielzahl von Fotos aus verschiedenen Quellen werden miteinander verknüpft und in einem virtuellen dreidimensionalen Raum bereitgestellt. Während sich der Nutzer durch diese 3D-Umgebung bewegt, bietet sich ihm ständig das seiner Position und Blickrichtung am ehesten entsprechende Bild. Der rasche Wechsel verschiedener Ansichten ist es, der erst den Eindruck einer 3D-Umgebung erweckt. Die Vorteile solcher Methoden liegen auf der Hand: Durch den Verzicht auf echte 3D-Körper entfällt der oftmals komplexe Schritt der geometrischen Modellierung. Damit wird der Umgang mit 3D-Datenstrukturen ebenso überflüssig wie die Übertragung der 3D-Modelle auf die Endgeräte der Nutzer. Die Bilder dienen quasi als vorberechnete 3D-Ansichten, ein aufwendiges Rendering erübrigt sich. Den Vorzügen stehen jedoch auch offensichtliche Nachteile gegenüber. Das völlige Fehlen geometrischer und semantischer Interpretation der Bildinhalte lässt keine Anwendungen zu, die über eine bloße Visualisierung hinausgehen. Aber auch bei der Visualisierung selbst ergeben sich Einschränkungen. Die Beleuchtungsverhältnisse entsprechen unabänderlich der Situation, in der die Bilder aufgenommen wurden. Darüber hinaus kann sich der Nutzer zwar um das betrachtete Objekt herum frei bewegen, die Palette der Betrachtungsmöglichkeiten hängt aber stark von der Menge der eingestellten Daten ab, so dass sich zwischen einzelnen Schritten größere Bildsprünge ergeben können. Da aber immer mehr Menschen ihre Umgebung mit Digitalkameras festhalten und im selben Maß die Bereitschaft steigt, die Aufnahmen der Öffentlichkeit zugänglich zu machen, entsteht eine Datenflut, die verspricht, bestehende Lücken immer weiter zu schließen. Die Möglichkeiten sind immens und müssen längst nicht nur auf Außenansichten beschränkt bleiben. Eine Anwendung auf kommerzielle Zwecke, etwa durch einen virtuellen Gang durch ein Kaufhaus, bietet sich ebenso an wie beispielsweise der bequeme Besuch eines Museums vom Computer aus. Inwieweit es sich bei der Nutzung solcher aus 2D-Daten simulierten 3D-Welten um ein vorübergehendes Phänomen oder einen dauerhaften Trend handelt, hängt stark von den Erfolgen im weiteren Bemühen um automatisch erzeugte und voll interpretierte 3D-Stadtmodelle ab, die weit mehr Informationen zur Verfügung stellen können.

Literaturverzeichnis

- 3D-Laser-Mapping (2007). StreetMapper 360: Specification. URL www.3dlasermapping.com/uk/mobile/brochure/StreetMapper%20-%20360%20Spec.pdf. Zugriff: Mai 2010.
- Ackermann, J. S. (1962). A theory of styles. *Journal of Aesthetics and Art Criticism*, 20(3):227–237.
- Aguilera, D. und Lahoz, J. (2006). Terrestrial laser scanner and high-resolution camera registration through single image-based modeling. In *Proceedings of VAST: International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage*, S. 53–60.
- Aho, A. V., Ethis, R. und Ullmann, J. D. (1992). *Compilerbau Teil 1*. Addison-Wesley.
- Akbarzadeh, A., Frahm, J.-M., Mordohai, P., Clipp, B., Engels, C., Gallup, D., Merrell, P., Phelps, M., Sinha, S., Talton, B., Wang, L., Yang, Q., Stewénius, H., Yang, R., Welch, G., Towles, H., Nistér, D. und Pollefeys, M. (2006). Towards urban 3D reconstruction from video. In *Proceedings of the 3rd International Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission (3DPVT '06)*.
- Akca, D., Grün, A., Freeman, M. und Sargent, I. (2009). Fast quality control of 3D city models. In *The International LIDAR Mapping Forum*.
- Al-Manasir, K. und Fraser, C. S. (2006). Registration of terrestrial laser scanner data using imagery. *Journal of Photogrammetric Record*, 21(115):255–268.
- Alegre, F. und Dellaert, F. (2004). A probabilistic approach to the semantic interpretation of building facades. In *Proceedings of the International Workshop on Vision Techniques Applied to the Rehabilitation of City Centres*, S. 1–12.
- Alexander, C. W. (1964). *Notes on the Synthesis of Form*. Harvard University Press.
- Ali, H., Seifert, C., Jindal, N., Paletta, L. und Paar, G. (2007). Window detection in facades. In *Proceedings of the 14th International Conference on Image Analysis and Processing (CIAP07)*, S. 837–842.
- Aliaga, D., Rosen, P. und Bekins, D. (2007). Style grammars for interactive visualization of architecture. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 13(4): 786–797.
- Alshawabkeh, Y., Haala, N. und Fritsch, D. (2006). 2D-3D feature extraction and registration of real world scenes. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36, S. 32–37.
- Ameri, B. (2000). Feature based model verification (FBMV): a new concept for hypothesis validation in building reconstruction. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 33 (B3), S. 24–35.
- Appelrath, H.-J. und Ludewig, J. (1992). *Skript um Informatik - eine konventionelle Einführung*. Verlag der Fachvereine Zürich.
- Arnheim, R. (1974). *Art and Visual Perception: A Psychology of the Creative Eye*. University of California Press.
- Baillard, C. und Zisserman, A. (1999). Automatic reconstruction of piecewise planar models from multiple views. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, S. 559–565.
- Bauer, J., Karner, K., Schindler, K., Klaus, A. und Zach, C. (2003). Segmentation of building models from dense 3D point-clouds. In *Proceedings of the 27th Workshop of the Austrian Association on Pattern Recognition*.
- Bauer, M., Coors, V., Schulz, T. und Zip, A. (2008). Zur Nutzung von 3D-Stadtmodellen für mobile Navigationssysteme. In *GI Days 2008 - Interoperability and spatical processing in GI applications*.
- Baumberg, A. (2000). Reliable feature matching across widely separated views. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, S. 774–781, Los Alamitos, CA, USA.
- Beardsley, P., Torr, P. und Zisserman, A. (1996). 3D model acquisition from extended image sequences. In *Proceedings of the 4th European Conference on Computer Vision (ECCV'96)*, S. 683–695.
- Becker, S. und Haala, N. (2007a). Combined feature extraction for façade reconstruction. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36 (3/W52), S. 44–49.
- Becker, S. und Haala, N. (2007b). Refinement of building facades by integrated processing of lidar and image data. In *Proceedings of the ISPRS Conference Photogrammetric Image Analysis (PIA07)*, S. 7–12.

- 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.
- Bekins, D. R. und Aliaga, D. G. (2005). Build-by-number: rearranging the real world to visualize novel architectural spaces. In *Proceedings of IEEE Visualization*, S. 143–150.
- Bellone, T., Mussio, L. und Nardinocchi, C. (1996). Strategies and procedures for relational matching. In *Reports on surveying and geodesy*, S. 22–35.
- Besl, P. und McKay, N. (1992). A method for registration of 3D shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14:239–256.
- Böhler, W., Bordas, V. M. und Marbs, A. (2003). Investigating laser scanner accuracy. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34.
- Böhm, J. und Becker, S. (2007). Automatic marker-free registration of terrestrial laser scans using reflectance features. In *Proceedings of the 8th Conference on Optical 3D Measurement Techniques*, S. 338–344.
- Böhm, J. (2004). Multi-image fusion for occlusion-free facade texturing. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35 (B5).
- Boudet, L., Papanoditis, N., Jung, F., Martinoty, G. und Pierrot-Deseilligny, M. (2006). A supervised classification approach towards quality self-diagnosis of 3D building models using digital aerial imagery. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36 (3), S. 136–141.
- Braess, M. (1997). *Strukturbasierte Merkmalszuordnung in kurzen stereoskopischen Videosequenzen*. PhD thesis, Geodätisches Institut der RWTH Aachen.
- Breitling, P. (1982). *In der Altstadt leben: Altstadterhaltung dargestellt am Beispiel Graz*. Leopold Stocker Verlag, Graz.
- Brenner, C. und Ripperda, N. (2006). Extraction of facades using rjMCMC and constraint equations. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36 (3), S. 155–160.
- Brenner, C. (2004). Modelling 3D objects using weak CSG primitives. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35.
- Brenner, C. (2005). Building reconstruction from images and laser scanning. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 6 (3-4):187–198.
- Brenner, C. (2010). *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*, Kapitel: Building Extraction, S. 169–212. Whittles Publishing.
- Bässmann, H. und Besslich, P. W. (1997). *Konturorientierte Verfahren in der digitalen Bildverarbeitung*. Springer-Verlag.
- Budroni, A. und Böhm, J. (2009). Toward automated reconstruction of interiors from laser data. In *Proceedings of the ISPRS Workshop 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures (3D-ARCH'09)*.
- Burden, E. (2000). *Elements of architectural design: a photographic sourcebook*. John Wiley & Sons, Inc.
- Canny, J. (1986). A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 8(6):679–698.
- Chalmers, A. F. (2007). *Wege der Wissenschaft*, Kapitel: Der Ansatz von Bayes, S. 141–154. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Chen, Y. und Medioni, G. (1991). Object modeling by registration of multiple range images. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, S. 2724–2729.
- Chomsky, N. (1959). On certain formal properties of grammars. *Information and Control*, 2:137–167.
- Claus, V. und Schwill, A. (2006). *Duden Informatik A-Z, Fachlexikon für Studium, Ausbildung und Beruf*. Bibliographisches Institut & F.A. Brockhaus AG.
- Cohen, J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement*, 20 (1):37–46.
- Coors, V. (2008). Synthetic textures for 3D urban models in pedestrian navigation. In *Proceedings of Techniques and Applications for mobile Commerce, (TAMoCo 2008)*, S. 46–53.
- Cornelis, N., Leibe, B., Cornelis, K. und van Gool, L. (2008). 3D urban scene modeling integrating recognition and reconstruction. *International Journal of Computer Vision*, 78(2-3):121–141.
- Cottle, R., Pang, J. S. und Stone, R. E. (1992). *The Linear Complementarity problem*. Academic Press.
- Cottle, R. W. und Dantzig, G. B. (1968). Complementary pivot theory of mathematical programming. *Linear Algebra and its applications*, 1:103–125.

- Cox, S., Daisy, P., Lake, R., Portele, C. und Whiteside, A. (2004). OpenGIS Geography Markup Language (GML3.1), Implementation Specification Version 3.1.0, OGC Doc, No. 03-105r1.
- Dehbi, Y., Schmittwilken, J. und Plümer, L. (2009). Learning semantic models and grammar rules of building parts. In *Proceedings of the ISPRS WG II/2+3+4 and Cost Workshop*.
- Dick, A., Torr, P. und Cipolla, R. (2004). Modelling and interpretation of architecture from several images. *International Journal of Computer Vision*, 60(2):111–134.
- Dold, C. (2005). Extended Gaussian images for the registration of terrestrial scan data. In *Proceedings of the ISPRS Workshop Laser scanning 2005*, S. 180–185.
- Dold, C. und Brenner, C. (2006). Registration of terrestrial laserscanning data using planar patches and image data. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36 (5), S. 78–83.
- Doneus, M. und Briese, C. (2006). Full-waveform airborne laser scanning as a tool for archaeological reconnaissance. In Campana, S. und Forte, M., Editoren, *From Space To Place, Proceedings of the 2nd International Conference On Remote Sensing In Archaeology*.
- Doneus, M., Pfennigbauer, M., Studnicka, N. und Ullrich, A. (2009). Terrestrial waveform laser scanning for documentation of cultural heritage. In *Proceedings of the 22nd International Symposium CIPA*.
- Downing, F. und Flemming, U. (1981). The bungalows of Buffalo. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 8(3):269–293.
- Duarte, J. (2003). A discursive grammar for customizing mass housing: the case of Siza's houses at Malagueira. *Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe*, 14:265–275.
- Durupt, M. und Taillandier, F. (2006). Automatic building reconstruction from a digital elevation model and cadastral data: an operational approach. In *Proceedings of the Symposium on Photogrammetric Computer Vision and Image Analysis (PCV '06)*.
- Eggert, D. W., Fitzgibbon, A. W. und Fisher, R. B. (1998). Simultaneous registration of multiple range views for use in reverse engineering of CAD models. *Computer Vision and Image Understanding*, 69(3):253–272.
- El-Sheimy, N. (1996). *The development of VISAT - a mobile survey system for GIS applications*. PhD thesis, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary.
- Elstrom, M. (1998). A stereo-based technique for the registration of color and LIDAR images. Master's thesis, University of Tennessee, Knoxville.
- Faro (2008). Faro Photon 80/20. URL www.faro.com/pdf/FARO_Photon_en.pdf. Zugriff: Mai 2010.
- Finkenzyeller, D. (2008). Detailed building facades. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 28(3):58–66.
- Fischer, A., Kolbe, T., Lang, F., Cremers, A., Förstner, W., Plümer, L. und Steinhage, V. (1998). Extracting buildings from aerial images using hierarchical aggregation in 2D and 3D. *Computer Vision and Image Understanding*, 72 (2):185–203.
- Fischler, M. A. und 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.
- Flemming, U. (1987). More than the sum of its parts: the grammar of Queen Anne houses. *Environment and Planning B*, 14:323–350.
- Focillon, H. (1948). *The life of forms in art*. Wittenborn Schultz, New York.
- Foley, J. D., van Dam, A., Feiner, S. K. und Hughes, J. F. (1990). *Computer graphics: principles and practice (2nd ed.)*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA.
- Freeman, M. und Sargent, I. (2008). Quantifying and visualising the uncertainty in 3D building model walls using terrestrial LIDAR data. In *Proceedings of the Remote Sensing and Photogrammetry Society Conference 2008*.
- Fritsch, D. (1985). *Optimization and Design of Geodetic Networks*, Kapitel: Some Additional Informations on the Capacity of the Linear Complementary Algorithm, S. 169–184. Springer-Verlag Berlin.
- Förstner, W. und Gülch, E. (1987). A fast operator for detection and precise location of distinct points, corners and circular features. In *Proceedings of the ISPRS Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data*, S. 281–305.
- Früh, C. und Zakhor, A. (2004). An automated method for large-scale, ground-based city model acquisition. *International Journal of Computer Vision*, 60(1):5–24.
- Furukawa, Y., Curless, B., Seitz, S. und Szeliski, R. (2009). Reconstructing building interiors from images. In *Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV 2009)*, S. 80–87.
- Gühring, J. (2001). Reliable 3D surface acquisition, registration and validation using statistical error models. In *Proceedings of the 3rd International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling (3DIM)*, S. 224–231.
- Gill, P., Murray, W. und Wright, M. (1991). *Numerical Linear Algebra and Optimization*. Addison Wesley.

- Gill, P. E., Murray, W., Saunders, M. A. und Wright, M. H. (1984). Procedures for optimization problems with a mixture of bounds and general linear constraints. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 10(3):282–298.
- Glennie, C. (2007). Reign of point clouds - a kinematic terrestrial LIDAR scanning system. *Inside GNSS*, 2 (7): 22–31.
- González-Aguilera, D., Rodríguez-Gonzálvez, P. und Gómez-Lahoz, J. (2009). An automatic procedure for co-registration of terrestrial laser scanners and digital cameras. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64:308–316.
- Gordon, S. und Lichti, D. (2004). Terrestrial laser scanners with a narrow field of view: the effect on 3D resection solutions. *Survey Review*, 37 (292):448–468.
- Grejner-Brzezinska, D. und Toth, C. (2002). Real-time mobile multi-sensor systems and their applications in GIS and mapping. In *Proceedings of the 2nd Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering*, S. 202–212.
- Gräfe, G. (2003). Mobile mapping with laser scanners using the MoSES. In Grün, A. und Kahmen, H., Editoren, *Proceedings of the 6th Conference on Optical 3D Measurement Techniques*, S. 381–388.
- Gröger, G., Kolbe, T., Lang, F., Czerwinski, A. und Nagel, C. (2008). OpenGIS City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard, Version 1.0.0, OGC Doc, No. 08-007r1. Open Geospatial Consortium.
- Grün, A. und Akca, D. (2005). Least squares 3D surface and curve matching. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 59:151–174.
- Grussenmeyer, P., Landes, T., Vögtle, T. und Ringle, K. (2008). Comparison methods of terrestrial laser scanning, photogrammetry and tacheometry data for recording of cultural heritage buildings. In *Proceedings of the 21st ISPRS Congress: Commission V, WG 2*, S. 213–218.
- Guarnieri, A., Vettore, A. und Remondino, F. (2004). Photogrammetry and ground-based laser scanning: assessment of metric accuracy of the 3D model of Pozzoveggiani church. In *Proceedings of the FIG Working Week 2004, Vol. TS26 Positioning and Measurement Technologies and Practices II - Laser Scanning and Photogrammetry*.
- 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.
- Haala, N., Peter, M., Kremer, J. und Hunter, G. (2008). Mobile LiDAR mapping for 3D point cloud collection in urban areas - a performance test. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36 (B5).
- Haegler, S. (2005). Modeling architecture with string grammars. Master's thesis, ETH Zürich.
- Hao, X. und Mayer, H. (2003). Orientation and auto-calibration of image triplets and sequences. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34 (3/W8), S. 73–78.
- Haring, A. (2007). *Die Orientierung von Laserscanner- und Bilddaten bei der fahrzeuggestützten Objekterfassung*. PhD thesis, Technical University Vienna.
- Harris, C. und Stephens, M. (1988). A combined corner and edge detection. In Matthews, M., Editor, *Proceedings of the 4th ALVEY vision conference*, S. 147–151.
- Henricsson, O. und Baltsavias, E. (1997). 3-D building reconstruction with ARUBA: a qualitative and quantitative evaluation. In *Proceedings of the Ascona97 Workshop: Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images II*, S. 65–76.
- Heringer, H. J. (1972). *Formale Logik und Grammatik*. Max Niemeyer Verlag.
- Hitchcock, F. L. (1941). The distribution of a product from several sources to numerous localities. *Journal of Mathematical Physics*, 20:224–230.
- Hoff, B. und Azuma, R. (2000). Autocalibration of an electronic compass in an outdoor augmented reality system. In *Proceedings of the IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality (ISAR 2000)*, S. 159–164.
- Hoffmann, C. (1989). *Solid and Geometric Modeling*. Morgan Kaufmann Publishers, San Mateo, CA, USA.
- Hohmann, B., Krispel, U., Havemann, S. und Fellner, D. (2009). Cityfit - high-quality urban reconstructions by fitting shape grammars to images and derived textured point clouds. In *Proceedings of the ISPRS Workshop 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures (3D-ARCH'09)*.
- Hopcroft, J. E. und Ullman, J. D. (1993). *Einführung in die Automatentheorie, formale Sprachen und Komplexitätstheorie*. Addison-Wesley.
- Hudson, W. und Ramm, C. (1987). Correct formulation of the kappa coefficient of agreement. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53(421-422).
- Ikeuchi, K., Nakazawa, A., Nishino, K. und Oishi, T. (2003). Creating virtual Buddha statues through observation. In *Proceedings of the IEEE/CVPR Workshop on Applications of Computer Vision in Archaeology*.
- Ingensand, H. und Schulz, T. (2005). Terrestrisches Präzisions-Laserscanning. In Chesi und Weinold, Editoren, *Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2005*. Wichmann-Verlag, Heidelberg.

- Ishikawa, K., Amano, Y., Hashizume, T., Takiguchi, J.-i. und Kajiwaru, N. (2007). A mobile mapping system for precise road line localization using a single camera and 3D road model. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 19 (2):174–180.
- Jenke, P., Huhle, B. und Strasser, W. (2009). Statistical reconstruction of indoor scenes. In *Proceedings of the 17th International Conference on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision (WSCG '09)*.
- Kaartinen, H., Hyypä, J., Gulch, E., Vosselman, G., Hyypä, H., Matikainen, L., Hofmann, A., Mader, U., Persson, A., Soderman, U., Elmqvist, M., Ruiz, A., Dragoga, M., Flamanc, D., Maillot, G., Kersten, T., Carl, J., Hau, R., Wild, E., Frederiksen, L., Holmgaard, J. und Vester, K. (2005). Accuracy of 3D city models: EuroSDR comparison. In *Proceedings of the International Workshop on Laser Scanning '05*, S. 227–232.
- 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*.
- Kada, M. (2007). Scale-dependent simplification of 3D building models based on cell decomposition and primitive instancing. In *Proceedings of the International Conference on Spatial Information Theory (COSIT)*, S. 222–237.
- Kalantari, M., Jung, F., Papanoditis, N. und Guedon, J. (2008). Robust and automatic vanishing points detection with their uncertainties from a single uncalibrated image, by planes extraction on the unit sphere. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37 (B3a), S. 203–208.
- Kersten, T., Przybilla, H.-J. und Lindstaedt, M. (2006). Integration, Fusion und Kombination von terrestrischen Laserscannerdaten und digitalen Bildern. In *Anforderungen an geometrische Fusionsverfahren, DIN Deutsches Institut für Normung e.V. und Humboldt-Universität zu Berlin*.
- Kersten, T. P., Mechelke, K., Lindstaedt, M. und Sternberg, H. (2009). Methods for geometric accuracy investigations of terrestrial laser scanning systems. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation (PFG)*, 4/2009: 301–315.
- Koch, K.-R. (2004). *Parameterschätzung und Hypothesentests*. Dümmler.
- Kolbe, T., Nagel, C. und Stadler, A. (2009). CityGML - OGC standard for photogrammetry? In Fritsch, D., Editor, *Photogrammetric Week '09*, S. 265–277. Wichmann-Verlag, Heidelberg.
- Kolbe, T. H., Gröger, G. und Plümer, L. (2005). CityGML - interoperable access to 3D city models. In Oosterom, Zlatanova und Fendel, Editoren, *Proceedings of the International Symposium on Geoinformation for Disaster Management*. Springer-Verlag.
- Koning, H. und Eizenberg, J. (1981). The language of the prairie: Frank Lloyd Wright's prairie houses. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 8(3):295–323.
- Kraus, K. (2004). *Photogrammetrie: Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen*. de Gruyter Verlag.
- Kremer, J. und Hunter, G. (2007). Performance of the Street-Mapper mobile LIDAR mapping system in 'real world' projects. In Fritsch, D., Editor, *Photogrammetric Week '07*, S. 215–225. Wichmann-Verlag, Heidelberg.
- Kukko, A., Andrei, C.-O., Salminen, V.-M., Kaartinen, H., Chen, Y., Rönnholm, P., Hyypä, H., Hyypä, J., Chen, R., Haggrén, H., Kosonen, I. und Capek, K. (2007). Road environment mapping system of the Finnish Geodetic Institute: FGI Roamer. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36 (3/W52), S. 241–247.
- Kutterer, H. (2010). *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*, Kapitel: Mobile Mapping, S. 293–311. Whittles Publishing.
- Lausberg, H. und Arens, A. (1990). *Handbuch der literarischen Rhetorik - Eine Grundlegung der Literaturwissenschaft*. Franz Steiner Verlag.
- Läbe, T. und Förstner, W. (2006). Automatic relative orientation of images. In *Proceedings of the 5th Turkish-German Joint Geodetic Days, Berlin*.
- Läbe, T. und Förstner, W. (2005). Erfahrungen mit einem neuen vollautomatischen Verfahren zur Orientierung digitaler Bilder. In *Proceedings of the DGPF Conference '05*.
- Lee, S. C. und Nevatia, R. (2004). Extraction and integration of window in a 3D building model from ground view images. In *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern recognition*, S. 113–120.
- Leibe, B., Leonardis, A. und Schiele, B. (2004). Combined object categorization and segmentation with an implicit shape model. In *Proceedings of the ECCV Workshop on Statistical Learning in Computer Vision*, S. 17–32.
- Leica (2006). Leica HDS3000 Product Specifications. URL www.leica-geosystems.com/media/new/product_solution/Leica_HDS3000.pdf. Zugriff: Mai 2010.

- Lemke, C. (1968). *Mathematics of the Decision Sciences Part I*, Kapitel: On Complementary Pivot Theory, S. 95–114. American Mathematical Society.
- Lemmens, M. (2009). Terrestrial laser scanners. *GIM International*, S. 62–67.
- Lichti, D. und Gordon, S. (2004). Error propagation in directly georeferenced terrestrial laser scanner point clouds for cultural heritage recording. In *Proceedings of the FIG Working Week '04*.
- Lichti, D. und Skaloud, J. (2010). *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*, Kapitel: Registration and Calibration, S. 83–133. Whittles Publishing.
- Lichti, D. D. (2004). A resolution measure for terrestrial laser scanners. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35 (B5/2).
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W. und Chipman, J. W. (2004). *Remote Sensing and Image Interpretation*. Wiley, 5th edition.
- Lindenbergh, R., Pfeifer, N. und Rabbani, T. (2005). Accuracy analysis of the Leica HDS3000 and feasibility of tunnel deformation monitoring. In *Proceedings of the Workshop Laser Scanning '05*.
- Lindenmayer, A. und Rozenberg, G. (1972). Developmental systems and languages. In *Proceedings of the 4th annual ACM Symposium on Theory of Computing (STOC '72)*, S. 214–221.
- Lipp, M., Wonka, P. und Wimmer, M. (2008). Interactive visual editing of grammars for procedural architecture. In *Proceedings of the 35th International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH '08)*, S. 1–10.
- Lowe, D. G. (2004). Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 60(2):91–110.
- Lucas, B. D. und Kanade, T. (1981). An iterative image registration technique with an application to stereo vision. In *Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, S. 674–679.
- Luhmann, T. (2003). *Nahbereichsphotogrammetrie - Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. Wichmann-Verlag, Heidelberg.
- Magnusson, M., Lilienthal, A. und Duckett, T. (2007). Scan registration for autonomous mining vehicles using 3D-NDT: Research Articles. *Journal of Field Robotics*, 24 (10):803–827.
- Manandhar, D. und Shibasaki, R. (2002). Auto-extraction of urban features from vehicle-borne laser data. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34 (4).
- Marr, D. und Hildreth, E. (1980). Theory of edge detection. In *Proceedings of the Royal Society of London, Series B, Biological Sciences*, S. 187–217.
- Marvie, J.-E., Perret, J. und Bouatouch, K. (2005). The FL-system: a functional L-system for procedural geometric modeling. *The Visual Computer*, 21(5):329–339.
- Matas, J., Chum, O., Urban, M. und Pajdla, T. (2004). Robust wide baseline stereo from maximally stable extremal regions. *Image and Vision Computing*, 22(10):761–767.
- Mayer, H. (2007). 3D reconstruction and visualization of urban scenes from uncalibrated wide-baseline image sequences. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation (PFG)*, 3/2007:167–176.
- Mayer, H. (2008). *Advances in Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences: 2008 ISPRS Congress Book*, Kapitel: Automated extraction of roads, buildings, and vegetation from multi-source data. CRC Press.
- McKeown, D. M., Bulwinkle, G. E., Cochran, S. D., Harvey, W. A., McGlone, J. C. und Shufelt, J. A. (2000). Performance evaluation for automatic feature extraction. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 33 (B2), S. 379–394.
- Meidow, J. und Schuster, H. (2005). Voxel-based quality evaluation of photogrammetric building acquisitions. In *ISPRS Workshop CMRT05 - Object Extraction for 3D City Models, Road Databases and Traffic Monitoring - Concepts, Algorithms and Evaluation*, S. 117–122.
- Meierhold, N., Bienert, A. und Schmich, A. (2008). Line-based referencing between images and laser scanner data for image-based point cloud interpretation in a CAD-environment. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37 (B5), S. 437–444.
- Metzger, W. (1975). *Gesetze des Sehens*. W. Kramer & Co., Frankfurt am Main.
- Mikolajczyk, K., Tuytelaars, T., Schmid, C., Zisserman, A., Matas, J., Schaffalitzky, F., Kadir, T. und van Gool, L. (2005). A comparison of affine region detectors. *International Journal of Computer Vision*, 65:43–72.
- Mikolajczyk, K. und Schmid, C. (2005). A performance evaluation of local descriptors. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 27(10):1615–1630.
- Mitchell, W. J. (1990). *The Logic of Architecture: Design, Computation, and Cognition*. MIT Press, Cambridge, MA, USA.

- Müller, P., Vereenooghe, T., Wonka, P., Paap, I. und van Gool, L. (2006a). Procedural 3D reconstruction of Puuc buildings in Xk'ipché. In *Eurographics Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage (VAST)*, S. 139–146.
- Müller, P. (2001). *Design und Implementation einer Preprocessing Pipeline zur Visualisierung prozedural erzeugter Stadtmodelle*. Diplomarbeit, ETH Zürich.
- 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.
- Müller, P., Zeng, G., Wonka, P. und van Gool, L. (2007). Image-based procedural modeling of facades. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 26(3).
- Mäntylä, M. (1988). *An introduction to solid modeling*. Principles of Computer Science Series. Computer Science Press, Rockville, MD.
- Mock, R. (1995). *Methoden zur Datenhandhabung in Zuverlässigkeitsanalysen*, Kapitel: Bayes-Statistik, S. 59–80. VDF Hochschulverlag.
- Mordohai, P., Frahm, J.-M., Akbarzadeh, A., Clipp, B., Engels, C., Gallup, D., Merrell, P., Salmi, C., Sinha, S., Talton, B., Wang, L., Yang, Q., Stewénius, H., Towles, H., Welch, G., Yang, R., Pollefeys, M. und Nistér, D. (2007). Real-time video-based reconstruction of urban environments. In *Proceedings of the ISPRS Workshop 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures (3D-ARCH'07)*.
- Nevill-Manning, C. G. und Witten, I. H. (1997). Compression and explanation using hierarchical grammars. *Computer Journal*, 40:103–116.
- Nistér, D. (2001). *Automatic dense reconstruction from uncalibrated video sequences*. PhD thesis, Department of Numerical Analysis and Computer Science, Royal Institute of Technology KTH, Stockholm.
- Nistér, D. (2004). An efficient solution to the five-point relative pose problem. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 26(6):756–777.
- Optech (2007). LYNX Mobile Mapper. URL www.optech.ca/pdf/LynxDataSheet.pdf. Zugriff: Mai 2010.
- Papoulis, A. (1965). *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*. McGraw-Hill Companies.
- Parish, Y. I. H. und Müller, P. (2001). Procedural modelling of cities. In *Proceedings of the 28th International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH '01)*, S. 301–308.
- Petrie, G. (2010). An Introduction to the Technology Mobile Mapping Systems. *Geoinformatics*, 1:32–43.
- Pfeifer, N. und Böhm, J. (2008). *Advances in Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences: 2008 ISPRS Congress Book*, Kapitel: Early Stages of LiDAR Data Processing, S. 169–184. ISPRS Book Series, CRC Press.
- Pfister, H., Zwicker, M., van Baar, J. und Gross, M. (2000). Surfels: surface elements as rendering primitives. In *Proceedings of the 27th International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH '00)*, S. 335–342. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- Pollefeys, M. (2004). Visual 3D modeling from images. In *Tutorial Notes of the 9th International Fall Workshop on Vision, Modeling, and Visualization (VMV04)*.
- Pollefeys, M., Nistér, D., Frahm, J., Akbarzadeh, A., Mordohai, P., Clipp, B., Engels, C., Gallup, D., Kim, S., Merrell, P., Salmi, C., Sinha, S., Talton, B., Wang, L., Yang, Q., Stewénius, H., Yang, R., Welch, G. und Towles, H. (2008). Detailed real-time urban 3D reconstruction from video. *International Journal of Computer Vision*, 78(2-3):143–167.
- Pollefeys, M., van Gool, L., Vergauwen, M., Verbiest, F., Cornelis, K., Tops, J. und Koch, R. (2004). Visual modeling with a hand-held camera. *International Journal of Computer Vision*, 59(3):207–232.
- Pritchett, P. und Zisserman, A. (1998). Matching and reconstruction from widely separated views. In *Proceedings of the European Workshop on 3D Structure from Multiple Images of Large-Scale Environments (SMILE'98)*, S. 78–92, London, UK. Springer-Verlag.
- Prusinkiewicz, P. und Lindenmayer, A. (1990). *The algorithmic beauty of plants*. Springer-Verlag New York, Inc.
- Pu, S. (2008). Generating building outlines from terrestrial laser scanning. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37 (B5), S. 451–456.
- Pu, S. und Vosselman, G. (2009a). Refining building facade models with images. In *Proceedings of the ISPRS Workshop on Object Extraction for 3D City Models, Road Databases and Traffic Monitoring (CMRT09)*, S. 217–222.
- Pu, S. (2010). *Knowledge based building facade reconstruction from laser point clouds and images*. PhD thesis, ITC - University of Twente, Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation.
- Pu, S. und Vosselman, G. (2009b). Building facade reconstruction by fusing terrestrial laser points and images. *Sensors*, 9(6):4525–4542.
- Rabbani, T., van den Heuvel, F. und Vosselman, G. (2007). An integrated approach for modelling and global registration of point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 61(6):355–370.

- Ragia, L. und Förstner, W. (1999). Automatically assessing the geometric and structural quality of building ground plans. *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et Télédétection*, 153:22–31.
- Ragia, L. und Winter, S. (2000). Contributions to a quality description of areal objects in spatial data sets. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 55: 201–213.
- Redstall, M. und Hunter, G. (2006). Accurate terrestrial laser scanning from a moving platform. *Geomatics World*, July/August:28–30.
- Remondino, F. und Ressel, C. (2006). Overview and experiences in automated markerless image orientation. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36, S. 248–254.
- Reznik, S. und Mayer, H. (2008). Implicit shape models, self-diagnosis, and model selection for 3D facade interpretation. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation (PFG)*, 3/2008:187–196.
- Rieger, P., Studnicka, N. und Ullrich, A. (2008). Mobile Laser Scanning: Anwendungen. RIEGL Laser Measurement Systems GmbH. URL http://www.riegl.com/uploads/tx_pxriegl/downloads/_Mobile_Laser_Scanning__Anwendungen.pdf. Zugriff: Mai 2010.
- Riegl (2001). Laser Mirror Scanner LMS-Q140-60-HR, Technical Documentation and User's Instructions, Edition 00-06, Rev 99-06-30 Software Ver.3.6. RIEGL Laser Measurement Systems GmbH.
- Riegl (2009a). Aktuelle Datenblätter: www.riegl.com. Zugriff: Mai 2010.
- Riegl (2009b). RIEGL VMX-250. URL http://www.riegl.com/uploads/tx_pxriegl/downloads/10_DataSheet_RIEGL_VMX-250_08-04-2010_PRELIMINARY.pdf. Zugriff: Mai 2010.
- Riegl (2009c). RIEGL VZ-400. URL http://www.riegl.com/uploads/tx_pxriegl/downloads/10_DataSheet_VZ400_02-06-2010_01.pdf. Zugriff: Mai 2010.
- Riegl (2009d). 2D Laser Scanner LMS-Q120. URL http://www.riegl.com/uploads/tx_pxriegl/downloads/10_DataSheet_LMS-Q120_20-04-2010.pdf. Zugriff: Mai 2010.
- Riegl (2009e). 2D Laser Scanner LMS-Q120i. URL http://www.riegl.com/uploads/tx_pxriegl/downloads/10_1_DataSheet_LMS-Q120i_20-04-2010.pdf. Zugriff: Mai 2010.
- Ripperda, N. (2008a). Determination of facade attributes for facade reconstruction. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37 (B3a), S. 285–290.
- Ripperda, N. (2008b). Grammar based facade reconstruction using rjMCMC. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation (PFG)*, 2/2008:83–92.
- Ripperda, N. und Brenner, C. (2005). Marker-free registration of terrestrial laser scans using the normal distribution transform. In *Proceedings of the ISPRS Workshop 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures (3D-ARCH'05)*.
- Roncella, R., Remondino, F. und Forlani, G. (2005). Photogrammetric bridging of GPS outages in mobile mapping. In Beraldin, El-Hakim, Grün und Walton, Editoren, *Proceedings of Videometrics VIII, SPIE-IS&T Electronic Imaging, Vol. 5665*, S. 308–319.
- Roth, G. (2004). Automatic correspondences for photogrammetric model building. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35 (B5), S. 713–718.
- Roth, G. und Whitehead, A. (2000). Using projective vision to find camera positions in an image sequence. In *Proceedings of the 13th Conference Vision Interface (VI 2000)*, S. 87–94.
- Rottensteiner, F. (2001). *Semi-automatic extraction of buildings based on hybrid adjustment using 3D surface models and management of building data in a TIS*. PhD thesis, TU Wien.
- Rubner, Y., Tomasi, C. und Guibas, L. J. (1998). A metric for distributions with applications to image databases. In *Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV '98)*, S. 59–66.
- Rusinkiewicz, S. und Levoy, M. (2001). Efficient variants of the ICP algorithm. In *Proceedings of the 3rd International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling*, S. 145–152.
- Rutzinger, M., Oude Elberink, S., Pu, S. und Vosselman, G. (2009). Automatic extraction of vertical walls from mobile and airborne laser scanning data. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38 (3/W8), S. 7–11.
- Salvi, J., Matabosch, C., Fofi, D. und Forest, J. (2007). A review of recent range image registration methods with accuracy evaluation. *Image and Vision Computing*, 25 (5):578–596.
- Samet, H. (2005). *Foundations of Multidimensional and Metric Data Structures (The Morgan Kaufmann Series in Computer Graphics and Geometric Modeling)*. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA.

- Sargent, I., Harding, J. und Freeman, M. (2007). Data quality in 3D: gauging quality measures from users' requirements. In *Proceedings of the 5th International Symposium on Spatial Data Quality*.
- Schaffalitzky, F. und Zisserman, A. (2002). Multi-view matching for unordered image sets. In *Proceedings of the 7th European Conference on Computer Vision-Part I (ECCV '02)*, S. 414–431.
- Schaffrin, B. (1981). Ausgleichung mit Bedingungs-Ungleichungen. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN)*, 6:227–238.
- Schenk, S. und Hanke, K. (2009). Genetic algorithms for automatic registration of laser scans with imperfect and subdivided features (GAReg-ISF). *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation (PFG)*, 1/2009:23–32.
- Schmittwilken, J., Kolbe, T. H. und Plümer, L. (2006). Der Gebäudekragen - Eine detaillierte Betrachtung des Übergangs von Gebäude und Gelände. In *Geoinformatik und Erdbeobachtung. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation*, S. 127–135.
- Schmittwilken, J., Ying Yang, M., Förstner, W. und Plümer, L. (2009). Integration of conditional random fields and attribute grammars for range data interpretation of man-made objects. *Annals of GIS*, 15 (2):117–126.
- Schnabel, R., Wahl, R. und Klein, R. (2007). Efficient RAN-SAC for point-cloud shape detection. *Computer Graphics Forum*, 26(2):214–226.
- Schuhmacher, S. und Böhm, J. (2005). Georeferencing of terrestrial laserscanning data for applications in architectural modeling. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36 (5/W17).
- Schuster, H.-F. und Weidner, U. (2003). A new approach towards quantitative quality evaluation of 3D building models. In *Proceedings of the ISPRS Commission IV Joint Workshop Challenges in Geospatial Analysis, Integration and Visualization II*.
- Shi, J. und Tomasi, C. (1994). Good features to track. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, S. 593–600.
- Snavely, N. (2008). *Scene reconstruction and visualization from internet photo collections*. PhD thesis, University of Washington.
- Stamos, I. (2009). Automated 3D modeling of urban environments. In *Proceedings of the ISPRS Workshop 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures (3D-ARCH'09)*.
- Sternberg, H., Casparly, W., Heister, H. und Klemm, J. (2001). Mobile data capturing on roads and railways utilizing the kinematic survey system KiSS. In *Proceedings of the 3rd International Symposium on Mobile Mapping Technology*.
- Stewénius, H., Engels, C. und Nistér, D. (2006). Recent developments on direct relative orientation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 60:284–294.
- Stiny, G. (1980a). Introduction to shape and shape grammars. *Environment and Planning B*, 7(3):343–351.
- Stiny, G. (1980b). Kindergarten grammars: designing with Froebel's building gifts. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 7(4):409–462.
- Stiny, G. und Gips, J. (1972). Shape grammars and the generative specification of painting and sculpture. *Information Processing*, 71:1460–1465.
- Stiny, G. und Mitchell, W. J. (1978). The Palladian grammar. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 5(1): 5–18.
- Stiny, G. (1982). Spatial relations and grammars. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 9(1):113–114.
- Suveg, I. und Vosselman, G. (2002). Mutual information based evaluation of 3D building models. In *Proceedings of the 16th International Conference on Pattern Recognition (ICPR '02)*, S. 188–197.
- TCM (2003). TCM Specifications. URL http://www.mil.ufl.edu/projects/gnuman/gnuman_pre2005/spec_sheets/tcm2_productsheet.pdf. Zugriff: Mai 2010.
- Tomasi, C. und Kanade, T. (1991). Shape and motion from image streams: a factorization method part 3 - detection and tracking of point features. Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, USA, Technical Report CMU-CS-91-132.
- Tuytelaars, T. und van Gool, L. (2004). Matching widely separated views based on affine invariant regions. *International Journal of Computer Vision*, 59(1):61–85.
- van Gool, L., Tuytelaars, T., Ferrari, V., Strecha, C., van den Wyngaerd, J. und Vergauwen, M. (2002). 3D modeling and registration under wide baseline conditions. In *Proceedings of the ISPRS Symposium Photogrammetric Computer Vision (PCV02)*, S. 3–14.
- van Gool, L., Zeng, G., van den Borre, F. und Müller, P. (2007). Towards mass-produced building models. In *Proceedings of the ISPRS Conference Photogrammetric Image Analysis (PIA07)*, S. 209–220.
- van Gool, L. und Zisserman, A. (1996). Automatic 3D model building from video sequences. In *Proceedings of the European Conference on Multimedia Applications, Services and Techniques*, S. 563–582.

- Vedaldi, A. (2007). An open implementation of the SIFT detector and descriptor. UCLA CSD.
- Vennegeerts, H., Paffenholz, J.-A., Martin, J. und Kutterer, H. (2009). Zwei Varianten zur direkten Georeferenzierung terrestrischer Laserscans. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation (PFG)*, 1/2009:33–42.
- Vergauwen, M. und van Gool, L. (2006). Web-based 3D reconstruction service. *Machine Vision Applications*, 17 (6):411–426.
- von Hansen, W. (2006). Robust automatic marker-free registration of terrestrial scan data. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36 (3), S. 105–110.
- von Meiss, P. (1990). *Elements of architecture: From form to place*. van Nostrand Reinhold (International).
- Vosselman, G. und Maas, H.-G., Editoren (2010). *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Whittles Publishing.
- Vosselman, G. (1992). *Relational Matching*. Lecture Notes in Computer Science. Springer-Verlag Berlin.
- Wendt, A. und Heipke, C. (2007). Area-based orientation of brightness, range and intensity images. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation (PFG)*, 3/2007: 187–198.
- Wendt, A. (2004). On the automation of the registration of point clouds using the metropolis algorithm. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35 (B3), S. 106–111.
- Wenzel, S. und Förstner, W. (2008). Semi-supervised incremental learning of hierarchical appearance models. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37 (B3a), S. 399–404.
- Werner, T. und Zisserman, A. (2002). New techniques for automated architectural reconstruction from photographs. In *Proceedings of the 7th European Conference on Computer Vision-Part II (ECCV '02)*, S. 541–555.
- Wertheimer, M. (1923). Untersuchungen zur Lehre der Gestalt II. *Psychologische Forschung*, 4:301–350.
- Wilczkowiak, M., Sturm, P. und Boyer, E. (2005). Using geometric constraints through parallelepipeds for calibration and 3D modeling. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 27(2):194–207.
- Wolf, M. (1999). Photogrammetric data capture and calculation for 3D city models. In Fritsch, D. und Spiller, R., Editoren, *Photogrammetric Week '99*, S. 305–312. Wichmann-Verlag, Heidelberg.
- Wonka, P., Wimmer, M., Sillion, F. und Ribarsky, W. (2003). Instant architecture. In *Proceedings of the 30th International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH '03)*, S. 669–677.
- Xiao, J., Fang, T., Tan, P., Zhao, P., Ofek, E. und Quan, L. (2008). Image-based facade modeling. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 27(5):1–10.
- Zeng, Z. und Wang, X. (1992). A general solution of a closed-form space resection. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing (PE&RS)*, 58(3):327–338.
- Zhao, H. und Shibasaki, R. (2002). Surface modelling of urban 3D objects from vehicle-borne laser range data. In *Proceedings of the Symposium on Photogrammetric Computer Vision and Image Analysis (PCV '02)*, S. 412–417.
- Zisserman, A., Fitzgibbon, A. W. und Cross, G. (1999). VHS to VRML: 3D graphical models from video sequences. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Multimedia Computing and Systems*, S. 51–57.

Lebenslauf

Persönliche Angaben

Susanne Becker

Geboren am 15. Juni 1979 in Mühlacker

Schulbildung

1985 – 1989	Grundschule Heidenwäldle Mühlacker
1989 – 1998	Theodor-Heuss-Gymnasium Mühlacker
23. Juni 1998	Abitur
1998 – 1999	Freie Kunstschule PART Stuttgart

Studium

1999 – 2004	Diplomstudium Geodäsie und Geoinformatik an der Universität Stuttgart
2. Juni 2004	Abschluss als Diplomingenieur an der Universität Stuttgart

Beruf

Seit Juni 2004	Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart
Seit Juli 2005	Mitarbeiterin im Sonderforschungsbereich 627

Dank

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 627 „Umgebungsmodelle für mobile kontextbezogene Systeme“ am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart. Der Deutschen Forschungsgemeinschaft sei für die finanziellen Mittel gedankt.

Bedanken möchte ich mich ebenso bei Herrn Prof. Dr. Dieter Fritsch, der mir die Möglichkeit gegeben hat, an seinem Lehrstuhl zu arbeiten und zu promovieren, sowie bei meinen Kollegen und meiner Familie.