

Jörg Schmittwilken

**Attributierte Grammatiken zur Rekonstruktion
und Interpretation von Fassaden**

München 2012

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

ISSN 0065-5325

ISBN 978-3-7696-5098-3

**Diese Arbeit ist gleichzeitig veröffentlicht in:
Schriftenreihe des Instituts für Geodäsie und Geoinformation
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms Universität Bonn
ISSN 1864-1113, Nr. 28, Bonn 2012**



DGK Deutsche Geodätische Kommission
bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C

Dissertationen

Heft Nr. 686

Attributierte Grammatiken zur Rekonstruktion und Interpretation von Fassaden

Inaugural-Dissertation zur
Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
der Hohen Landwirtschaftlichen Fakultät
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms Universität
zu Bonn

vorgelegt am 14.11.2011 von

Jörg Schmittwilken

aus Rheine

München 2012

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission bei der C. H. Beck'schen Verlagsbuchhandlung München

ISSN 0065-5325

ISBN 978-3-7696-5098-3

Diese Arbeit ist gleichzeitig veröffentlicht in:
Schriftenreihe des Instituts für Geodäsie und Geoinformation
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms Universität Bonn
ISSN 1864-1113, Nr. 28, Bonn 2012

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>

Prüfungskommission

Referent: Prof. Dr.rer.nat. Lutz Plümer,
Institut für Geodäsie und Geoinformation, Universität Bonn
Korreferenten: Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c.mult. Wolfgang Förstner,
Institut für Geodäsie und Geoinformation, Universität Bonn
Prof. Dr.-Ing. Dieter Fritsch,
Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart

Tag der mündlichen Prüfung: 10.02.2012

Diese Dissertation ist auch auf dem Hochschulschriftenserver der ULB Bonn
<<http://hss.ulb.uni-bonn.de/2012/2780/2780.htm>> elektronisch publiziert (Erscheinungsjahr 2012).

© 2012 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 978-3-7696-5098-3

Für meine Familie
Britta, Pauline, Henriette und Josefine

Kurzfassung

Dem Bedarf und Nutzen hoch detaillierter 3D-Stadt- und Gebäudemodelle steht deren aufwendige Erfassung gegenüber. Ist die automatische Ableitung vereinfachter Dachstrukturen aus Luftbildern oder Laseraltimetrie weitestgehend gelöst, so existieren für terrestrisch erfasste Daten nur erste Ansätze zur automatischen Rekonstruktion der Fassadenstruktur. Diese zielen zumeist auf die Interpretation großer, planarer Fassaden ab und reduzieren sie auf die regelmäßige Anordnung von Fenstern. Im Wesentlichen mangelt es daher sowohl an Verfahren zur Rekonstruktion weiterer Fassadenelemente wie Treppen oder Türen als auch an Methoden zur Interpretation heterogener, komplexer Fassaden mit Vorsprüngen, Erkern sowie einer geringen Anzahl von Fenstern.

Die vorliegende Arbeit thematisiert die Interpretation von 3D-Punktwolken, die mittels terrestrischem Laserscanning in urbanen Räumen erfasst wurden. Der Fokus liegt dabei auf 3D-Punktwolken heterogener Fassaden, die sich durch eine geringe Breite sowie durch Vorsprünge und Erker auszeichnen. Das Ziel der Arbeit ist die Rekonstruktion und Interpretation von Fassaden durch einen Parser, der attributierte Grammatiken und robuste Schätzer kombiniert. Aufgrund der Generizität der verwendeten Attributgrammatiken ist die Schätzung von Modellen mit einer vorab unbekanntem Anzahl von Parametern möglich und der Varianz der Objekte wird somit Rechnung getragen.

Das vorgestellte Konzept zeichnet sich durch die starke Integration von Vorwissen aus. Es wird sowohl ein geometrisches als auch ein semantisches Modell von Fassaden aufgestellt und in die attributierte Grammatik überführt. Darüber hinaus werden Wahrscheinlichkeitsdichten der Form- und Lageparameter der betrachteten Fassadenteile aus gemessenen Daten geschätzt und in der attributierten Grammatik kodiert. Die entsprechenden *a priori* Wahrscheinlichkeiten sind wesentlicher Bestandteil des vorgestellten robusten Schätzverfahrens *MOSAP* sowie des Parsing-Algorithmus *parse3d*.

Die Relationen zwischen einzelnen Fassadenteilen werden auf die Grammatik abgebildet, die somit zur Repräsentation der komplexen Strukturen dient und die Basis des Parsing-Algorithmus darstellt. Beginnend mit dem allgemeinsten Symbol werden durch *parse3d* iterativ Produktionsregeln angewendet und so Modellhypothesen in Form von Ableitungsbäumen erzeugt, von denen schließlich die Wahrscheinlichste gewählt wird. Die Selektion der abzuleitenden Symbole sowie der anzuwendenden Regeln basiert auf den *a priori* Wahrscheinlichkeiten sowie den Wahrscheinlichkeitsdichten, die aus Kontextinformation wie den Parametern bereits rekonstruierter Objekte oder Teilmengen der 3D-Punktwolken geschätzt werden. Die Schnittstelle zwischen Grammatik und 3D-Punktwolke wird durch den robusten Schätzer *MOSAP* sowie die eingeführten *Guards* realisiert. Letztere bestimmen die Wahrscheinlichkeit einer Produktionsregel und ermöglichen so deren Selektion.

Die Grammatiksymbole, die durch eine geringe Anzahl von Parametern geometrisch definiert sind, werden durch einen robusten Schätzer rekonstruiert. Es wird der Algorithmus *MOSAP* (Model Based Sampling and Prediction) eingeführt, der auf dem hypothesize-and-verify Paradigma basiert und sich durch das modellbasierte Sampling auszeichnet, in das Modellwissen in Form von Wahrscheinlichkeitsdichten der Form- und Lageparameter der zu bestimmenden Objekte eingebracht wird. Darüber hinaus wird die *Prädiktionsgüte* als neuartiges Kriterium zur Bewertung der Modellhypothesen eingeführt.

Abstract

The needs and benefits of highly detailed 3D city and building models is opposed to their expensive acquisition. Though the automatic derivation of simplified roof structures from aerial images or laser altimetry is mostly solved, only a few approaches for the automatic reconstruction of facade structures from terrestrial data were presented yet. Most of the existing work is on the interpretation of large, planar facades that are reduced to a regular arrangement of windows. Therefore, it lacks in both, the reconstruction of additional facade elements such as stairs or doors as well as methods for the interpretation of heterogeneous and complex facades with protrusions, oriels and only a small number of windows.

This thesis deals with the interpretation of 3D point clouds that have been captured by terrestrial laser scanning of urban areas. The focus is on 3D point clouds of heterogeneous facades, that are characterized by their narrow width and by protrusions and oriels. The main contribution is the reconstruction and interpretation of facades by a parser that combines attribute grammars and robust estimators. Due to the generic attribute grammar the estimation of models with a previously unknown number of parameters is possible and the heterogeneity of the objects is thus considered.

The concept is distinguished by the heavily integration of prior knowledge. The geometric and the semantic model of facades are defined and transferred to the attributed grammar. Furthermore, the probability densities of the shape and position parameters of the considered facade parts are estimated and incorporated in the attributed grammar. The corresponding *a priori* probabilities are essential for the presented robust estimator *MOSAP* and the parsing algorithm *parse3d*.

The relations between single parts of a facade are mapped to the attribute grammar. Therefore, the grammar represents the complex structures of facades and constitutes the foundation of the parsing algorithm. Beginning with the most common symbol *parse3d* iteratively applies production rules and, thus, generates hypothesis represented by derivation trees. Finally the most likely derivation tree is selected. Both, the selection of the symbol to be derived and the selection of the production rule to be applied base on the *a priori* probabilities and the densities that are estimated from the context information like the parameters of already reconstructed objects or subsets of the 3D point cloud. The interface between the grammar and the 3D point clouds is realized by the robust estimator *MOSAP* and *guards*. The latter determine the likelihood of a production rule and, therefore, provide a selection criterion.

The symbols of the grammar that are geometrically defined by a small set of parameters are reconstructed by a robust estimator. *MOSAP* (Model Based Sampling and Prediction) bases on the hypothesize-and-verify paradigm and is characterized by the model-based sampling strategy that takes advantage of the probability densities of the shape and position parameters of the objects to be reconstructed. Furthermore, *MOSAP* evaluates the hypothesis by the newly introduced *goodness of prediction* criterion.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	xiii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Ziele und Methoden	3
1.2.1 Arbeitshypothesen	4
1.2.2 Methodik	5
1.3 Übersicht und Gliederung	7
2 Grundlagen und Related Work	9
2.1 Datengrundlage	9
2.1.1 Terrestrische Laserscans	9
2.1.2 Terrestrische Bilder	12
2.1.3 Zusammenfassung	12
2.2 Theoretische Grundlagen	12
2.2.1 Probabilistische Modellierung	13
2.2.2 Geometrische Modellierung	15
2.2.3 Erfassung von 3D-Punktwolken	16
2.2.4 Analyse von 3D-Punktwolken	17
2.2.5 Formale Grammatiken	21
2.2.6 Zusammenfassung	28
2.3 Literaturreview	28
2.3.1 Arbeiten zu geometrischen Grammatiken	29
2.3.2 Arbeiten zur Rekonstruktion von Gebäuden und Gebäudeteilen	37
2.4 Zusammenfassung	41
3 Formalisierung von Vorwissen	43
3.1 Symmetrie und Proportion in der Architektur	43
3.2 Das semantische Modell	44
3.2.1 Fassaden	45
3.2.2 Fenster	48
3.2.3 Treppen	49
3.3 Das Geometriemodell	50
3.4 Quantifizierbares Vorwissen	51
3.4.1 Quantifiziertes Vorwissen	51
3.4.2 Repräsentation quantifizierten Vorwissens	52
3.4.3 Konkludiertes Vorwissen	53
3.5 Zusammenfassung	56

4	Rekonstruktion einzelner Fassadenteile	59
4.1	MOSAP - Modellbasiertes Sampling und Prädiktion	59
4.1.1	Modellbasiertes Sampling	60
4.1.2	Modellbewertung durch Prädiktion	61
4.2	Rekonstruktion von Treppen mit MOSAP	63
4.2.1	Das Treppen-Modell	63
4.2.2	Lagebasiertes Sampling	64
4.2.3	Formbasiertes Sampling	66
4.2.4	Prädiktionsgüte	68
4.2.5	Schätzen unbestimmter Parameter	68
4.2.6	Ergebnisse	70
4.3	Rekonstruktion von Fenstern mit MOSAP	70
4.3.1	Das Fenstern-Modell	70
4.3.2	Lagebasiertes Sampling	71
4.3.3	Formbasiertes Sampling	72
4.3.4	Prädiktionsgüte	76
4.3.5	Schätzen unbestimmter Parameter	76
4.3.6	Ergebnisse	78
4.4	Zusammenfassung	80
5	Attributierte Grammatik zur Modellierung von Fassaden	83
5.1	Adaption attributierter Grammatiken	84
5.1.1	Semantische Regeln als Constraints	84
5.1.2	Guards	85
5.1.3	Unifikation	86
5.2	Die Fassadengrammatik	87
5.2.1	Abbildung des semantischen Modells	87
5.2.2	Repräsentation von Geometrie	89
5.2.3	Integration des quantifizierten Vorwissens	91
5.3	Synthetisches Generieren von Fassaden	92
5.4	Zusammenfassung	93
6	Identifikation und Rekonstruktion aggregierter Strukturen in Fassaden	95
6.1	Der Parsingalgorithmus parse3d	95
6.1.1	Anwenden von Produktionsregeln	97
6.1.2	Selektion von Nichtterminalen	98
6.1.3	Selektion von Produktionsregeln	99
6.1.4	Zusammenfassung parse3d	100
6.2	Realisierung der Guards	100
6.2.1	Relevante Muster	101
6.2.2	Identifikation von Erkern	102
6.2.3	Identifikation von Öffnungen	105
6.3	Zusammenfassung	108

7	Schlussbemerkungen	109
7.1	Zusammenfassung	110
7.2	Übertragbarkeit	112
7.3	Ausblick	112
A	Häufigkeitsverteilungen und Wahrscheinlichkeitsdichten	115
A.1	Erker	115
A.2	Gebäude	116
A.3	Türen	117
A.4	Treppen	118
A.5	Fenster	119
A.6	Balkone	120
B	Terrestrische 3D-Punktwolken	121
B.1	Terrestrische 3D-Punktwolken	121
C	Terrestrische Bilder von Fassaden	127
C.1	Terrestrische Bilder von Fassaden	127
D	Das Programm <i>MeasureFacade</i>	133
D.1	Funktionalität	133
D.1.1	Datenaufbereitung	133
D.1.2	Vermessen von Objekten	134
D.1.3	Annotation	135
D.1.4	Export von Teilmengen von 3D-Punktwolken	135
E	Das Programm XGep	137
	Literaturverzeichnis	143
	Index	155

Abkürzungsverzeichnis

(x, y, z)	Koordinatentripel – Das Koordinatensystem ist wie folgt festgelegt: Die z -Achse beschreibt die Lotrechte, die größte senkrechte, planare Fläche einer Fassade liegt in der xz -Ebene und das Gebäudeinnere im Halbraum positiver y -Koordinaten.
$A \rightarrow a B$	Notation einer Produktionsregel, die A durch $a B$ ersetzt
$A.u$	Notation von Symbol (A) und zugeordnetem Attribut (u)
ALKIS	Amtliche Liegenschaftskataster-Informationssystem
ALS	Airborne Laserscanning
B-Rep	Boundary Representation
BBox	Bounding Box
CSG	Constructive Solid Geometry
DGM	Digitales Geländemodell
DOM	Digitales Oberflächenmodell
GML	Geography Markup Language
LIDAR	Light Detection and Ranging
MBB	Minimum Bounding Box
MBR	Minimum Bounding Rectangle
MCMC	Markov-Chain Monte Carlo
MLE	Maximum Likelihood Estimation
MLS	Mobiles Laserscanning
MOSAP	Model-Based Sampling and Prediction
PCA	Principle Component Analysis
RANSAC	Random Sample Consensus
SUS	Stochastic Universal Sampling
TIN	Triangular Irregular Network
TLS	Terrestrisches Laserscanning
UML	Unified Modelling Language
VRML	Virtual Reality Modeling Language
X3D	Extensible 3D
XML	Extensible Markup Language
XSLT	Extensible Stylesheet Language Transformation

1 Einleitung

Diese Arbeit thematisiert die Interpretation von 3D-Punktwolken, die durch terrestrisches Laserscanning in urbanen Räumen erfasst wurden. Es wird ein modellbasierter Ansatz zur Rekonstruktion von Fassaden vorgestellt, der es durch die Integration einer attribuierten Grammatik und eines robusten Schätzer in einen Parsingalgorithmus ermöglicht, Modelle mit einer vorab unbekanntem Anzahl von Parametern zu schätzen. Aufgrund der Verwendung von *a priori* Wahrscheinlichkeiten der Form- und Lageparameter ist die Schätzung robust gegen eine große Anzahl von Ausreißern in den Beobachtungsdaten. Darüber hinaus wird aufgrund der durchgängigen probabilistischen Modellierung die Bewertung der generierten Modellhypothesen sowie die abschließende Modellselektion unterstützt.

Im Folgenden wird in Abschnitt 1.1 die Rekonstruktion von Fassaden aus 3D-Punktwolken motiviert und in Abschnitt 1.2 ein Überblick über die Ziele und Methoden dieser Arbeit gegeben.

1.1 Motivation

Für viele Menschen, insbesondere jene mit Affinität zu Computern und Internet, ist die Verwendung frei zugänglicher 2D- und 3D-Geoinformation in Form von Produkten wie *Maps*, *Street View* oder *Earth* der Firma *Google* sowie *bing maps* oder *Street Side* der Firma *Microsoft* alltäglich. Mit Hilfe von Karten, schräg oder senkrecht aufgenommenen Luftbildern oder virtuellen 3D-Stadtmodellen werden Urlaubsziele vorab erkundet, Impressionen und das Flair unbekannter Stadtviertel aus der Ferne eingefangen oder einfach nur Auto-Routen für den Besuch bei Freunden geplant.

Insbesondere 3D-Stadtmodelle helfen einen räumlichen Eindruck urbaner Szenen zu vermitteln. Wegen der vertrauten Perspektive eines Fußgängers oder Auto- bzw. Fahrradfahrers ist vor allem die realitätsnahe Darstellung der Fassaden, also der senkrechten Wände, von großer Bedeutung. Dabei ist der Grad der Immersion einer virtuellen Szene sowie der Grad der räumlichen Kognition ebenso von der Erfahrung des Benutzers wie vom Detaillierungsgrad des Modells abhängig (Schönfeld, 2008). Letzterer kann durch Fototexturierung aber auch durch die Erhöhung der geometrischen Auflösung des Modells gesteigert werden.

Die detailliertere geometrische Ausgestaltung ist der Fototexturierung vorzuziehen, da Fototexturen eine falsche Tiefenwahrnehmung vermitteln. Bei der Betrachtung einer Szene aus der jeweiligen Aufnahmerichtung des Fotos wirkt die Szene zwar realistisch, bei der Änderung des Betrachterstandpunktes wird wegen der dann falschen perspektivischen Darstellung jedoch eine widersprüchliche Vorstellung des Raums vermittelt.

Die wachsende Zahl an Nutzern von 3D-Stadt- und Gebäudemodellen wie beispielsweise die Stadtplanung, das Standortmarketing oder die Tourismusbranche belegen ebenso wie

die große Zahl der verfügbaren 3D-Stadtmodelle die Verbreitung und Akzeptanz dieser Art von 3D-Geoinformation. Stichlig (2011) merkt an, dass der „Nutzen und das wirtschaftliche Potential dieser Daten in jüngster Zeit zunehmend entdeckt wird, und so zukünftig auch der Bedarf gerade an hoch aufgelösten Modellen steigen wird“.

Viele Anwendungen wie Erreichbarkeits- oder Immissionsberechnungen werden erst durch den hohen geometrischen Detailgrad der Modelle möglich — sie erfordern aber neben der Geometrie auch die Semantik der Objekte. Für die Beurteilung und automatische Berechnung der Erreichbarkeit ist z.B. die Information, ob es sich bei einem „Loch“ in der Wand um ein Fenster oder eine Abluftöffnung handelt, eine ganz entscheidende. Semantisch reichhaltige Modelle stellen gegenüber rein geometrischen Modellen einen echten Mehrwert dar, der weitere Anwendungsfelder erschließen wird.

Dem Bedarf an solchen geometrisch und semantisch hoch aufgelösten 3D-Stadtmodellen steht jedoch deren Erfassung entgegen, die noch nicht automatisiert für kleinmaßstäbige Gebiete wie Stadtteile möglich ist.

Bis vor einigen Jahren wurde das Ziel der Gewinnung von 3D-Stadtmodellen ausschließlich über die Auswertung von Luftbildern oder luftgestützter Laseraltimetrie – beide ggf. in Kombination mit Katasterdaten – verfolgt, da andere flächendeckende Daten nicht zur Verfügung standen. Die entsprechenden Arbeiten (Herman und Kanade, 1986; Weidner und Förstner, 1995; Fischer et al., 1998; Brenner und Haala, 1998; Baillard und Zisserman, 1999; Kolbe, 2000) und Produkte wie *CyberCity Modeler* oder *inJECT* rekonstruieren aufgrund der verwendeten Daten ausschließlich Grundrisse, Gebäudehöhen und Schätzungen der Dachformen. Eine detaillierte Rekonstruktion der Fassaden mit Stockwerken, Erkern, Fenstern, Türen, oder Treppen war wegen der extrem steilen Ansicht von oben und der daraus resultierenden geringen Auflösung der Projektion der senkrechten Wände nicht möglich. Wegen der Verdeckung durch Vegetation oder andere Gebäude ist auch die Rekonstruktion aus luftgestützten Schrägaufnahmen, wie etwa den von Pictometry International Corp. (2010) eingeführten *Oblique Imagery*, gerade im innerstädtischen Bereich nicht erfolgversprechend. Zwar liefern auch aktuelle Methoden zur Bestimmung von 3D-Punktwolken aus Bildern, s.g. Multi-View-Stereo-Verfahren (Furukawa et al., 2010; Frahm et al., 2010; Goesele et al., 2007), einen Beitrag zur terrestrischen Datenerfassung, doch gerade die Kombination von Laserscannern oder Kameras mit hoch präzisen Inertialsensoren (inertial measurement unit, IMU) und deren Einsatz auf mobilen Plattformen hat sich als Methode zur schnellen, effizienten und flächenhaften Erfassung von Fassaden etabliert. Zur Steigerung der Auflösung und Vermeidung von Abschattungen ist allerdings statisches, terrestrisches Laserscanning zu bevorzugen. Arbeiten zur Rekonstruktion geometrischer Primitive aus solchen 3D-Punktwolken (Pu und Vosselman, 2009; Reznik und Mayer, 2008; Wahl et al., 2005) tragen zum flächenhaften Erstellen von 3D-Stadtmodellen bei. Jedoch existieren bisher nur wenige automatische Auswerteverfahren, die sowohl die Geometrie als auch die Semantik von Fassaden rekonstruieren (Müller et al., 2007; Ripperda, 2008; Becker, 2009) und zudem auf heterogene Fassaden anwendbar sind.

Eben dort setzt diese Arbeit an und stellt ein Konzept zur Rekonstruktion solcher Fassaden vor, deren Oberfläche nicht durch eine planare Fläche zu approximieren ist und die durch Vorsprünge und einer Vielzahl von Teilobjekten wie Fenster, Türen, Treppen oder Erker geprägt sind. Im nächsten Abschnitt werden die verwendeten Methoden sowie die Ziele näher erläutert und Arbeitshypothesen aufgestellt.

1.2 Ziele und Methoden

Das Konzept zur Rekonstruktion und Interpretation von Fassaden mit attribuierten Grammatiken, das dieser Arbeit zugrunde liegt, ist in Abbildung 1.1 dargestellt und wird im Folgenden erläutert.

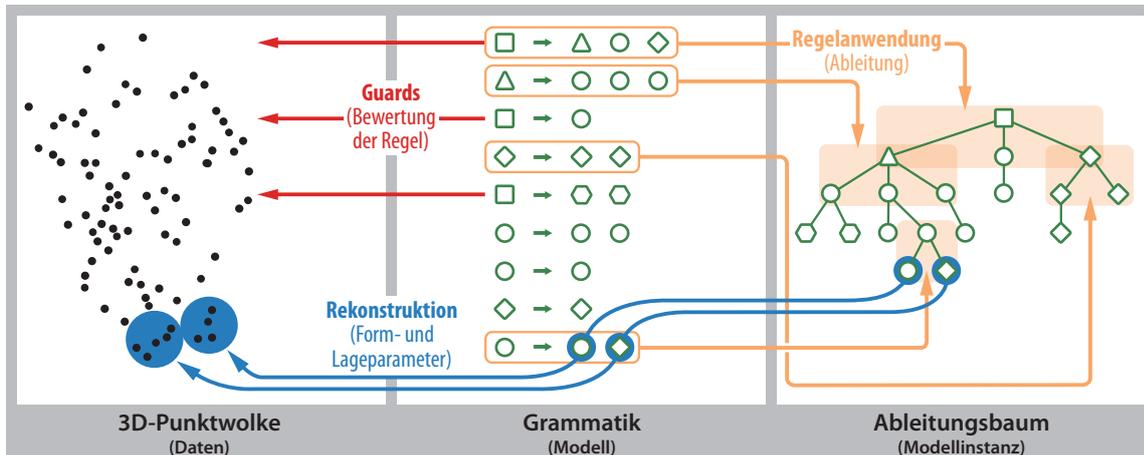


Abbildung 1.1: Konzept des Parsings von 3D-Punktwolken zur Rekonstruktion und Interpretation von Fassaden

Die Abbildung zeigt das Konzept zur modellbasierten Rekonstruktion und Interpretation von 3D-Punktwolken durch Parsing. Die in der Mitte dargestellten Produktionsregeln der attribuierten Grammatik definieren das Modell, mit dessen Hilfe die Beobachtungsdaten (3D-Punktwolke, links) interpretiert und die beste Modellinstanz (Ableitungsbaum, rechts) geschätzt wird. Die Produktionsregeln der Grammatik beschreiben die Struktur der Objekte *vom Großen ins Kleine*. Durch sukzessive Anwendung der Produktionsregeln wird die Modellinstanz schrittweise erzeugt (orange Pfeile). Wegen der regelbasierten Modellierung ist dieser Prozess sehr generisch und es werden Modelle geschätzt, deren Parameterzahl vorab unbekannt ist. Zur Auswahl der „richtigen“, zu den Daten passenden Produktionsregeln aus der Menge aller anwendbaren Regeln werden diese durch *Guards* unter Berücksichtigung der Daten bewertet (rote Pfeile). Im jeweiligen Kontext ergeben sich die Daten aus den Parametern bereits rekonstruierter Objekte sowie aus dem vorab bekannten, quantifizierten Vorwissen. So werden durch Bedingungen Teilmengen der 3D-Punktwolke definiert oder durch Vererbung weitere Parameter bestimmt. Wird eine Produktionsregel ausgewählt und angewendet, so werden die Lage- und Formparameter der durch die Symbole der rechten Seite repräsentierten Objekte aus der 3D-Punktwolke geschätzt (blaue Pfeile). Da die rekonstruierten Symbole oft nur einer geringen Teilmenge der 3D-Punktwolke entsprechen (blaue Kreise, links), ist die Robustheit der Schätzung von besonderer Bedeutung. Die starke Integration von Vorwissen über Lage- und Formparameter der zu rekonstruierenden Objekte in Form von *a priori* Wahrscheinlichkeiten charakterisieren das hier vorgestellte Konzept. Das Vorwissen wird in Form von Wahrscheinlichkeitsdichten in der Grammatik kodiert und findet sowohl bei den *Guards* (rote Pfeile) als auch in den robusten Schätzverfahren

(blaue Pfeile) Anwendung. Diese probabilistische Modellierung erlaubt es, die erzeugten Modellinstanzen zu bewerten und die Wahrscheinlichste auszuwählen.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der detaillierten Rekonstruktion heterogener Fassaden. Insbesondere liegen Gebäude mit wenigen Stockwerken, deren dem öffentlichen Verkehrsraum zugewandte Fassade durch Vorsprünge, Erker und durch Ornamente sowie Gesimse stark strukturiert ist, im Fokus – beispielsweise Gebäude des Jugendstils. Die Interpretation großer, homogener Fassaden, die sich einerseits durch die regelmäßige Anordnung von Fenstern und andererseits durch das Nichtvorhandensein von Vorsprüngen und Erkern auszeichnen, also durch eine planare Masche approximiert werden können, ist ein Spezialfall der hier behandelten Objekte und wurde in jüngster Zeit bereits von einigen Arbeiten adressiert (Becker, 2009; Ripperda und Brenner, 2009; Wenzel et al., 2008; Reznik und Mayer, 2008; Pu und Vosselman, 2009; Müller et al., 2007).

Entsprechend werden Fassaden im Rahmen dieser Arbeit nicht ausschließlich über die enthaltenen Fenster definiert, sondern es werden Objekte wie Treppen, Türen, Eingänge oder Erker definiert und in den Rekonstruktionsprozess einbezogen. Der hier vorgestellte grammatikbasierte Ansatz zur Rekonstruktion von Fassaden beginnt mit der Modellierung von Fassaden sowie der Quantifizierung von Vorwissen über die Formparameter der modellierten Objekte. Beides, das relationale Modell sowie das Vorwissen über die Formparameter, wird in der attribuierten *Fassadengrammatik* formalisiert. Die attribuierte Grammatik erlaubt es, die geschätzten Parameter eines Teilobjekts an die übrigen Objekte zu vererben und so für deren Rekonstruktion zu verwenden oder die Identität einzelner Parameter zu bedingen.

1.2.1 Arbeitshypothesen

Dem oben erläuterten Konzept liegen die im Folgenden aufgestellten Arbeitshypothesen zugrunde.

- (1) Nichtparametrische Wahrscheinlichkeitsdichten sind zur Repräsentation des Vorwissen einfach strukturierter Objekte geeignet.

Wie oben beschrieben, ist die Integration von Vorwissen wesentlich für das vorgestellte Konzept. Die durchgängige probabilistische Modellierung beginnt mit einfach strukturierten Objekten wie Fenstern, die sich durch wenige Parameter beschreiben lassen. Es ist zu zeigen, dass sich Vorwissen durch nichtparametrische Wahrscheinlichkeitsdichten repräsentieren und so in die modellbasierte Rekonstruktion integrieren lässt.

In Ergänzung dessen wird angenommen:

- (2) Attribuierte Grammatiken sind zur Repräsentation des Vorwissens komplexer Strukturen geeignet.

Die Modellierung komplexer Strukturen wie Fassaden ist nur durch eine große Anzahl von Parametern möglich. Parametrisierte Modelle sind oft wenig generisch und somit nicht auf eine Vielzahl ähnlicher Objekte übertragbar. Es ist zu zeigen, dass attribuierte Grammatiken dieses Problem lösen und auch komplexe Strukturen generisch beschreiben.

Da Teilmengen von 3D-Punktwolken oder einzelne Punkte nicht den Symbolen der Grammatik entsprechen wird angenommen:

- (3) Robuste Schätzer schließen die Lücke zwischen Grammatiken und Beobachtungsdaten.

Wegen der unterschiedlichen Art der Repräsentation und Diskretisierung ist die Abbildung von mehrdimensionalen, unvollständigen und verrauschten Punktwolken auf die Symbole einer Grammatik zunächst nicht möglich. Es ist zu zeigen, dass sich robuste Schätzer dazu eignen, die Grammatiksymbole auf eine Teilmenge einer 3D-Punktwolke abzubilden.

Die Anzahl möglicher Ableitungsbäume ist für Grammatiken mit rekursiven Regeln unendlich groß. Daher ist die strukturierte Analyse möglicher Ableitungen notwendig:

- (4) Die Auswahl von Produktionsregeln durch Guards ermöglicht das Parsen von 3D-Punktwolken.

Schließlich ist zu zeigen, dass Parsing von 3D-Punktwolken möglich ist und die Verwendung von *a priori* Wahrscheinlichkeiten bei der Bedingung der Regelauswahl die abschließende Modellselektion ermöglicht.

1.2.2 Methodik

Das Ziel der semantischen und geometrischen Interpretation von Fassaden wird durch einen *top-down* Ansatz verfolgt. Die Realwelt wird hierzu zunächst durch ein abstraktes Modell beschrieben, das sowohl die Semantik der zu rekonstruierenden Objekte in Form von Assoziations-, Aggregations- und Generalisierungsbeziehungen als auch deren geometrische Ausprägung in Form von geometrischen Primitiven und *a priori* Wahrscheinlichkeiten der entsprechenden Formparameter beschreibt.

Die hier verwendeten abstrakten Modelle werden im Formalismus *attributierter Grammatiken* spezifiziert. Wegen ihrer Charakteristik als regelbasierte Ersetzungssysteme erlauben sie eine kompakte Beschreibung der Modelle sowie eine hohe Generizität. So können Modelle beliebiger Komplexität mit variabler Anzahl von Parametern modelliert werden.

Es wird gezeigt, wie attributierte Grammatiken zur Modellierung des Vorwissens, also des semantischen, geometrischen sowie probabilistischen Modells, verwendet werden können. Hier steht die Repräsentation von Vorwissen in Form von Wahrscheinlichkeitsdichten im Vordergrund. Auch die Möglichkeit der Repräsentation von Symmetrie und die Wahrung der Identität von Form- und Lageparametern wie beispielsweise Parallelitäten oder Fluchten im gesamten Modell wird durch die Definition von Bedingungen für die Rekonstruktion genutzt. Dies ist gerade für die Modellierung von urbanen Strukturen wie Gebäuden und Fassaden vorteilhaft, da dort Orthogonalität dominiert.

In klassischen Rekonstruktionsverfahren werden die unbekannt Parameter gegebener Modelle geschätzt. So setzen beispielsweise die Methode der kleinsten Quadrate (Koch, 2004) oder robuste Schätzer wie RANSAC (Random Sample and Consensus, Fischler und Bolles, 1981) eine vorab definierte Zielfunktionen und somit eine feste Anzahl von Parametern voraus. Da der Minimierung der Residuenquadrate die Annahme der Normalverteilung der Fehler zugrunde liegt, reagiert das Verfahren sehr empfindlich auf eine hohe Anzahl von Ausreißern, die zumeist nicht normalverteilt sind. So ist zur Schätzung von Teilobjekten aus

3D-Punktwolken stets ein robustes Verfahren zu bevorzugen, das auch bei sehr großen Punktmengen mit hohem Anteil von Ausreißern – beispielsweise liegen in einem durchschnittlichen Laserscan einer Hausfassade nur ca. 0,005 % der Punkte auf der Eingangstreppe – noch optimale Ergebnisse liefert.

Wegen ihrer Generizität bieten sich gerade attributierte Grammatiken zur Beschreibung derartiger Modelle an. Der wesentliche Beitrag dieser Arbeit liegt in der Integration von Attributgrammatik und robusten Schätzverfahren zur Rekonstruktion von Fassaden aus 3D-Punktwolken. Dabei wird die Grammatik zur Repräsentation der komplexen Strukturen wie Aggregation oder Generalisierungsbeziehungen verwendet. Die Symbole der Grammatik, die sich durch eine geringe Anzahl von Parametern beschreiben lassen, werden durch robuste Schätzverfahren rekonstruiert. Durch diese Kombination werden auch heterogene Fassaden einschließlich ihrer Teile wie Wände, Erker, Fenster und Treppen geometrisch sowie semantisch rekonstruiert. Die Struktur der Fassade wird dabei geschossübergreifend erfasst und Bedingungen wie Parallelität oder die Vererbung von Formparametern gewährt.

Es wird der neue robuste Schätzer *MOSAP* (Model Based Sampling and Prediction) vorgestellt, der auf dem hypothesize-and-verify Konzept beruht, das auch RANSAC zugrunde liegt. Durch die starke Integration von Vorwissen in Form von Wahrscheinlichkeitsdichten der Lage- und Formparameter wird die Anzahl nötiger Samples im hypothesize-Schritt deutlich verringert. Auch die Verifikation der aus einem Sample abgeleiteten Modellinstanz wird durch das hierzu eingeführte Maß der *Prädiktionsgüte* verbessert, da nur die mögliche Oberfläche der Modellinstanz betrachtet wird und so aufwendige Abstandsberechnung des Modells zu allen Punkten der 3D-Punktwolke entfallen kann.

Die Integration dieses Schätzers in einen Parsing-Algorithmus ermöglicht schließlich auch die Rekonstruktion aggregierter Strukturen. Durch Anwenden der Grammatik steuert der Parser nämlich die Rekonstruktion der Teilobjekte und deren Aggregation zur Fassade. Da die atomaren Elemente der Grammatik jedoch nicht 3D-Punktwolken oder einzelne Punkte repräsentieren, sondern Objekte, die durch geometrische Primitive beschrieben werden können, ist die Schätzung der Lage- und Formparameter quasi als Übersetzung zwischen der 3D-Punktwolke und der Grammatik notwendig. Trotz des sequenziellen Vorgehens des Parsers, das die unmittelbare Prüfung von Bedingungen zwischen einzelnen Teilobjekten ausschließt, wird die Identität der bedingten Parameter durch *Unifikation* (Russel und Norvig, 2003) sicher gestellt.

Zur Steuerung des Parsers werden *Guards* eingeführt, die aus der Menge der auf ein Symbol anwendbaren Produktionsregeln die Wahrscheinlichste auswählen. Dazu bestimmen die Guards die Wahrscheinlichkeit einer Produktionsregel aus den *a priori* geschätzten Dichten der Form- und Lageparameter der einzelnen Objekte sowie den Dichten der einzelnen Koordinatenwerte, die aus relevanten Teilmengen der 3D-Punktwolke geschätzt werden.

Durch Anwenden der Produktionsregeln entstehen Ableitungsbäume, die Modellhypothesen entsprechen. Wegen der durchgängigen probabilistischen Modellierung wird schließlich die wahrscheinlichste Modellhypothese gewählt.

1.3 Übersicht und Gliederung

Im folgenden Kapitel 2 werden die hier für diese Arbeit erfassten Daten sowie die verwendeten Konzepte und Theorien erläutert und der Stand relevanter Forschungsarbeiten vorgestellt.

Im daran anschließenden Kapitel 3 werden nach der Übersicht über architektonische Gestaltungsprinzipien das semantische sowie das geometrische Modell der für diese Arbeit relevanten Fassadenteile vorgestellt. Dort werden die entsprechenden Begriffe definiert und ihre gegenseitigen Beziehung beschrieben. Darüber hinaus werden grundsätzliche Annahmen zur Gestaltung insbesondere zur Symmetrie von Fassaden angestellt und die Ergebnisse entsprechender empirischer Untersuchungen vorgestellt.

Weiterhin werden in Kapitel 3 die erfassten Daten qualitativ und quantitativ beschrieben. Insbesondere wird die Repräsentation von Vorwissen durch geschätzte Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Lage- und Formparameter der einzelnen Objekte thematisiert.

Kapitel 4 thematisiert die Interpretation von Messdaten mit dem Fokus auf der Rekonstruktion einzelner Fassadenteile aus 3D-Punktwolken. Der MOSAP-Algorithmus wird als robuster Schätzer für parametrisierte Modell vorgestellt. Das dort verwendete modellbasierte Sampling, das auf den *a priori* Wahrscheinlichkeiten der Lage- und Formparameter beruht, wird erläutert und die auf dem neuen Bewertungsmaß der *Prädiktionsgüte* beruhende Selektion von Modellhypothesen eingeführt. Anschließend wird das Verfahren am Beispiel von Treppen und Fenstern erläutert und entsprechende empirische Ergebnisse präsentiert.

Im Anschluss daran wird in Kapitel 5 die Fassadengrammatik vorgestellt und deren Herleitung aus dem in Kapitel 3 vorgestellten Modell erläutert. Darüber hinaus wird die Verwendung semantischer Regeln als Constraints, die Integration von Unifikation zur Attributpropagierung im Ableitungsbaum sowie durch die Einführung von Guards präsentiert. Neben der Diskussion der Kodierung von Geometrie und Wahrscheinlichkeitsdichten wird abschließend das synthetische Generieren von Fassaden erläutert, um die Generizität der Modellierung mit Grammatiken zu unterstreichen.

Schließlich wird in Kapitel 6 der Parsing-Algorithmus *parse3d* vorgestellt, der die Rekonstruktion aggregierter Strukturen von Fassaden ermöglicht. Die Selektion der abzuleitenden Nichtterminale wird ebenso erläutert wie die Selektion der anzuwendenden Produktionsregeln. Beide Selektionsverfahren basieren auf den Wahrscheinlichkeiten, die aus den Wahrscheinlichkeitsdichten der Form- und Lageparameter sowie der probabilistischen Modellierung der zu interpretierenden Daten bestimmt werden. Die Realisierung der Guards wird exemplarisch für die Identifikation von Erkern und Fenstern erläutert.

Abschließend werden die vorgestellten Beiträge in Kapitel 7 zusammenfassend bewertet und es werden mögliche Erweiterungen sowie die Adaption der präsentierten Konzepte auf andere Daten und Probleme skizziert.

Die Arbeit wird durch die Anhänge A bis E ergänzt. In Anhang A werden alle erfassten Häufigkeitsverteilungen sowie die geschätzten Wahrscheinlichkeitsdichten gezeigt. In den Anhängen B und C werden exemplarisch einige 3D-Punktwolken und Bilder der verwendeten Datensätze vorgestellt. Die Beschreibung der entwickelten Software *MeasureFacade* sowie *XG^{EP}* folgt schließlich in den Anhängen D und E.

2 Grundlagen und Related Work

Die in dieser Arbeit thematisierte grammatikbasierte Rekonstruktion und Interpretation von Fassaden aus 3D-Punktwolken setzt neben den zu analysierenden Daten die Kenntnis einer Reihe von Verfahren und Konzepten voraus.

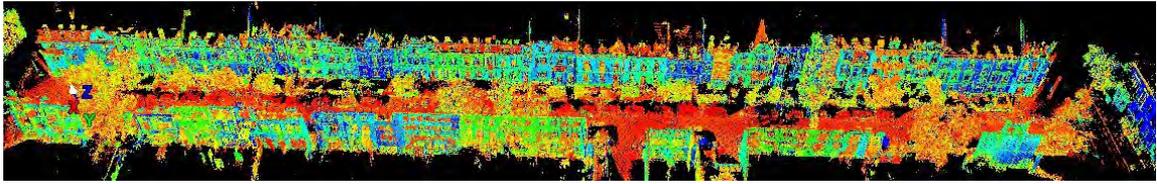
In Abschnitt 2.1 werden daher zunächst die für diese Arbeit erfassten Daten vorgestellt. Abschnitt 2.2 führt dann in die theoretischen Grundlagen ein und erläutert die entsprechenden Konzepte beispielhaft. Da auch Arbeiten anderer Autoren die Rekonstruktion von Fassaden oder die Modellierung von Gebäuden mit formale Grammatiken thematisieren, werden die relevanten Arbeiten in Abschnitt 2.3 vorgestellt und diskutiert. Abschließend werden die Erkenntnisse dieses Kapitels in Abschnitt 2.4 zusammengefasst.

2.1 Datengrundlage

Zur Entwicklung der hier beschriebenen Verfahren, aber auch zur Gewinnung von Vorwissen in Form von Verteilungen von Lage- und Formparametern wurden 3D-Punktwolken mittels terrestrischem Laserscanning sowie Fotos von Fassaden erfasst. Im Folgenden wird die Erfassung sowie der Umfang dieser Daten erläutert.

2.1.1 Terrestrische Laserscans

Die 3D-Punktwolken wurden im terrestrischen, statischen Verfahren mit einem HDS6100 der Firma Leica erfasst. Zur Reduktion von Verdeckungen durch Vegetation, Zäune oder Fahrzeuge vor Gebäuden wurde der Laserscanner für einige Aufnahmen auf dem Dach eines Messbusses montiert. Von dieser Plattform wurden die *Goethestraße* und die *Rittershausstraße* in der Bonner Südstadt durchgängig vermessen. In den Szenen wurden Zielmarken platziert, sodass die lokalen Koordinatensysteme der jeweiligen 3D-Punktwolken in der Nachbearbeitung in ein gemeinsames Koordinatensystem überführt werden konnten. Die Daten liegen in lokalen Koordinatensystemen vor. Aus den zwei resultierenden 3D-Punktwolken (vgl. Abbildung 2.1) wurden manuell 85 Teilpunktwolken selektiert, die jeweils die Fassade eines einzelnen Gebäudes beschreiben. Abbildung 2.3 zeigt exemplarisch eine 3D-Punktwolke. Weitere Datensätze sind in Anhang B abgebildet. Neben den genannten Objekten wurden auch ca. 41 Fassaden von Mehrfamilienhäusern sowie Reihen- und Doppelhäuser im Bonner Stadtgebiet vermessen.



(a) Goethestraße



(b) Rittershausstraße

Abbildung 2.1: Terrestrisch erfasste 3D-Punktwolken der Bonner Südstadt. Die Farbkodierung gibt die Intensität des reflektierten Signals wieder.

Orientierung der 3D-Punktwolken

Da die Daten in relativen Koordinatensystemen vorliegen, wird das Koordinatensystem so gewählt, dass die größte senkrechte, planare Fläche der Fassade in der xz -Ebene liegt und negative x - und z -Koordinaten vermieden werden. Eine derartige Orientierung der 3D-Punktwolken führt zur Achsparallelität der meisten Wandflächen der Fassaden (vgl. Abbildung 2.2).

Dazu wird die größte senkrechte, planare Fläche mit dem robusten Schätzer MLESAC (vgl. Abschnitt 2.2.4, S. 20) geschätzt. Eventuell ist noch eine Rotation von 180° um die z -Achse notwendig, um das Äußere des Gebäudes im Halbraum negativer y -Koordinaten festzulegen.

Dazu werden die Mediane der z -Koordinaten der beiden Teilmengen

$$T^- = \{(x, y, z) \in P \mid y \in [-\infty, -0.10]\} \text{ und } T^+ = \{(x, y, z) \in P \mid y \in [0.10, \infty]\}$$

verglichen und die Rotation durchgeführt, falls der größere Medianwert für T^- ermittelt wird. Dieser impliziert nämlich stets das Innere des Gebäudes, das im Halbraum positiver y -Koordinaten liegen soll.

Die Evaluation dieser Heuristik und der automatischen Orientierung bestätigte seine Robustheit: Nur vier der 126 Datensätzen wurden falsch orientiert.

Die orientierten Datensätze wurden zur weiteren Verarbeitung in *Matlab* (MathWorks, 2010) im entsprechenden .mat Format gespeichert. Dieses hat sich bezüglich der Dateigröße und der Geschwindigkeit des Datenimports als sehr vorteilhaft erwiesen. Außerdem wurde für jede Punktwolke ein kd-Baum (Bentley, 1975) unter Verwendung der Implementation von Michael (2008) berechnet, um effizient raumbezogene Abfragen zur Selektion von Teilpunktwolken durchführen zu können (s. Kapitel 4.1).

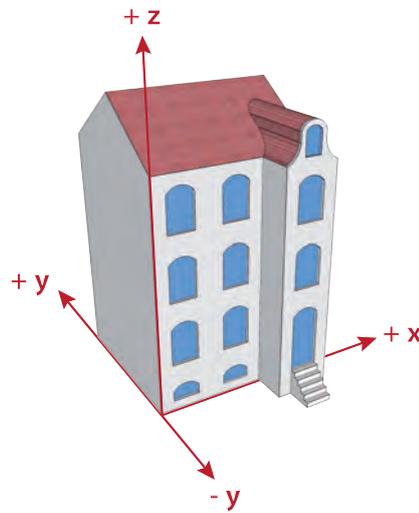
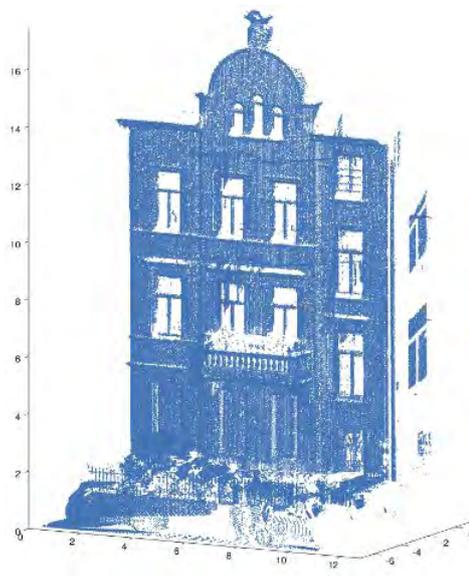


Abbildung 2.2: Darstellung des Koordinatensystems



(a)



(b)

Abbildung 2.3: Rektifiziertes Bild (rechts) und 3D-Punktwolke (links) eines Hauses der Bonner Südstadt. Es sind 80 % der verfügbaren Punkte dargestellt.

2.1.2 Terrestrische Bilder

Neben den 3D-Punktwolken wurden ca. 500 Frontalaufnahmen von Gebäuden erfasst. Diese werden zur Ableitung von Vorwissen über die zu rekonstruierenden Objekte genutzt.

Die terrestrischen Bilder wurden mit den kalibrierten, digitalen Spiegelreflexkameras Nikon D700 (20 mm Festbrennweite) und Canon 350D (18 mm bis 55 mm, kalibriert und fixiert auf 18 mm) aufgenommen. Abbildung 2.3 (weitere Bilder in Anhang C) zeigt exemplarisch ein entzerrtes und rektifiziertes Bild einer Fassade.

Zur quantitativen Analyse der Bilder wurde das Programm *MeasureFacade* (Staat und Schmittwilken, 2010) entwickelt, das neben der Vermessung der einzelnen Objekte auch zur Entzerrung, Rektifizierung und Skalierung der Bilder verwendet wird. *MeasureFacade* wurde in MATLAB implementiert und ist unter <http://www.ikg.uni-bonn.de/forschung/projektarchiv/measurefacade.html> frei verfügbar. Anhang D gibt einen kurzen Überblick über den Funktionsumfang und die Benutzerschnittstelle von *MeasureFacade*.

Zur Entzerrung der Bilder werden die vorab bestimmten Kalibrierdaten verwendet. Die Rektifizierung basiert auf der Fluchtpunktberechnung zweier orthogonal zueinander stehenden Paare paralleler Liniensegmente (McGlone, 2004). Zur Bestimmung des Bildmaßstabs wurde eine im Bild leicht identifizierbare Strecke, für gewöhnlich die Breite der Eingangstür vor Ort gemessen.

2.1.3 Zusammenfassung

Durch die Erfassung von ca. 120 3D-Punktwolken von Fassaden mit terrestrischem Laserscanning und ca. 500 Fassadenbildern mit kalibrierten Kameras steht eine große Zahl von Datensätzen zur Ableitung von Vorwissen zur Verfügung. Mithilfe der hierzu entwickelten Software *MeasureFacade* wurden Strecken in 3D-Punktwolken und Bildern gemessen und somit Lage- und Formparameter quantifiziert. Darüber hinaus wurden die ganzzahligen Modellparameter durch Abzählen erfasst.

2.2 Theoretische Grundlagen

Einleitend werden wahrscheinlichkeitstheoretische Grundlagen (Abschnitt 2.2.1) sowie Modelle zur geometrischen Beschreibung dreidimensionaler Objekte in Abschnitt 2.2.2 vorgestellt. Da die Analyse von 3D-Punktwolken die Kenntnis des Sensormodells voraussetzt, wird dieses anschließend in Abschnitt 2.2.3 erläutert und durch einen Überblick über gängige Erfassungsverfahren ergänzt. In Abschnitt 2.2.4 werden Verfahren der Datenanalyse vorgestellt, die speziell für 2D- oder 3D-Punktwolken entwickelt wurden oder sich auf diese Daten übertragen lassen. In Abschnitt 2.2.4 wird der RANSAC-Algorithmus als prominenter Vertreter des hypothesize-and-verify Paradigmas vorgestellt, auf dem auch der in Kapitel 4 präsentierte MOSAP-Algorithmus zur Rekonstruktion durch Prädiktion basiert. Abschließend führt Abschnitt 2.2.5 in den Formalismus attributierter Grammatiken ein.

2.2.1 Probabilistische Modellierung

Mit dem Ziel, aus einer endlichen Menge von Beobachtungen eines Phänomens *a priori* Wahrscheinlichkeiten einer konkreten Realisierung berechnen zu können, werden im Folgenden einige wahrscheinlichkeitstheoretische Grundlagen dargestellt sowie das Konzept der Kerndichteschätzer erläutert.

Grundlagen

Kann eine Zufallsvariable X nur diskrete Werte x_i mit $i \in [1, n]$ annehmen, gibt es eine Wahrscheinlichkeitsfunktion $f(x)$, die jedem Wert $X = x_i$ eine *Wahrscheinlichkeit* $P(x_i)$ zugeordnet. Es gilt

$$\sum_{i=1}^n P(x_i) = 1.$$

Für eine Zufallsvariable X mit kontinuierlichem Wertebereich ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Zufallsvariable einen Wert im Intervall (a, b) annimmt, gegeben durch das Integral über die *Wahrscheinlichkeitsdichte* (*Dichte*) $P(x)$

$$P(x \in (a, b)) = \int_a^b p(x) dx. \quad (2.1)$$

Aus der Grenzwertbetrachtung $a \rightarrow b$ folgt $P(X = x_i) = 0$. Im Folgenden wird $P(x \in (a, b)) = P(x)$ unter impliziter Annahme des Intervalls $[a, b]$ verwendet (s.u.). Analog zum diskreten Fall gilt

$$\int_{-\infty}^{\infty} p(x) dx = 1. \quad (2.2)$$

Zur funktionalen Beschreibung der Dichte werden häufig unimodale Verteilungen wie die Normalverteilung oder die Betaverteilung, Multimodalverteilungen wie Mischverteilungen oder nichtparametrische Verteilungen verwendet.

Ein Histogramm bzw. die durch die Klassenhäufigkeiten definierten Punkte stellt eine *empirische Dichte* dar.

Die Beobachtung eines Phänomens kann als Realisierung einer Zufallsvariable betrachtet werden. Das Ziel der probabilistischen Modellierung ist es, aus einer endlichen Menge von Beobachtungen desselben Phänomens die kontinuierliche Dichte zu schätzen und somit *a priori* Wahrscheinlichkeiten für bestimmte Realisierungen des Phänomens berechnen zu können.

Abbildung 2.4 zeigt dies beispielhaft anhand der Breite von Fenstern. Es wurden die Breite von 870 Fenstern gemessen und das entsprechende Histogramm erstellt (links oben). Die lineare Interpolation der Klassenhäufigkeiten (links unten) entspricht – abgesehen von der wegen Gleichung 2.2 notwendigen Skalierung – angenähert dem Graphen der Dichte. Mit geeigneten Schätzverfahren werden nun die Parameter gegebener Dichtefunktionen wie z.B. der Normalverteilung geschätzt (rechts). Da diese die empirischen Häufigkeiten nicht sehr genau approximiert, werden im nächsten Abschnitt Kerndichteschätzer als nichtparametrische

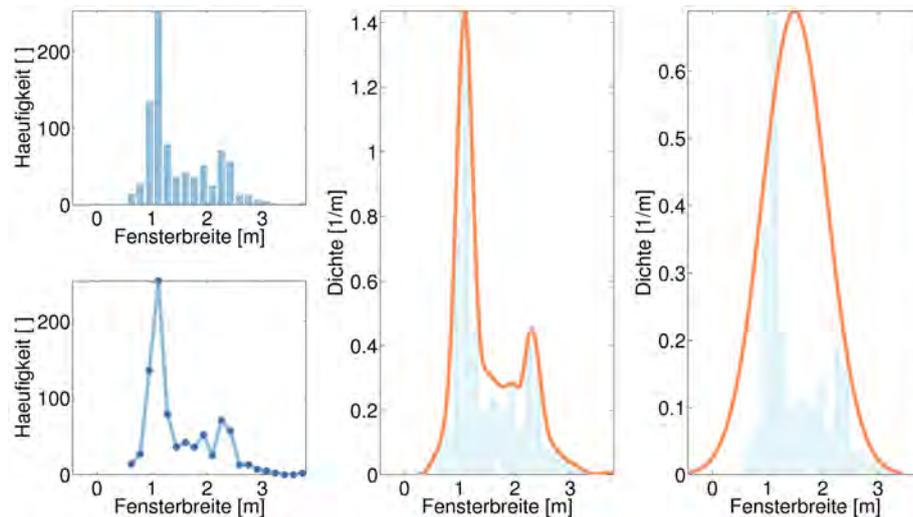


Abbildung 2.4: Histogramm (links oben) und linear interpolierte Klassenhäufigkeiten (links unten), mit Kerndichteschätzer geschätzte Dichte (Mitte), als Normalverteilung angenommene Dichte (rechts). Die Parameter der Normalverteilungen sowie der geschätzten Kerndichte sind nicht identisch und wurden jeweils optimal geschätzt. In beiden Diagrammen wurde die relative Häufigkeit des Histogramms auf den Maximalwert der geschätzten Dichte normiert.

Dichteschätzer vorgestellt. Die mit diesem Verfahren geschätzte Dichte (Mitte) approximiert die Daten besser. Die Parameter der Normalverteilungen sowie der geschätzten Kerndichte sind nicht identisch und wurden jeweils optimal geschätzt. In beiden Diagrammen wurde die relative Häufigkeit des Histogramms auf den Maximalwert der geschätzten Dichte normiert.

Da nach Gleichung 2.1 die Wahrscheinlichkeit, dass die Breite eines Fenster in einem bestimmten Intervall liegt, durch ein Integral definiert wird, erklärt es sich, dass die Dichte die Einheit $1/m$ hat, damit die Wahrscheinlichkeit dimensionslos ist.

Wegen Gleichung 2.1 ist die Angabe der Wahrscheinlichkeit einer Fensterbreite $P(b)$ von $1,75$ m nicht sinnvoll, da $P(b = 1,75) = 0$. Erst die zusätzliche Angabe eines Genauigkeitsintervalls, z.B. ± 1 mm, vervollständigt die Angabe. Dies wird im Folgenden stets impliziert, sodass die Wahrscheinlichkeit $P(b = 1,75)$ im Folgenden als $P(b \in (1,74, 1,76))$ angenommen wird. Die Genauigkeit von ± 1 mm entspricht dem Sensormodell (vgl. Abschnitt 2.2.3, S. 16).

Nachdem nun die relevanten wahrscheinlichkeitstheoretischen Zusammenhänge erläutert wurden, wird im nächsten Abschnitt das Konzept der Kerndichteschätzer erläutert, die zur nichtparametrischen Schätzung von Dichten verwendet werden.

Kerndichteschätzer

Kerndichteschätzer (kernel density estimators, Wand und Jones, 1994; Wang und Suter, 2004) werden zur nichtparametrischen Schätzung von Wahrscheinlichkeitsdichten verwendet. Dazu

werden uni- oder multivariate Dichtefunktionen als Kern K verwendet, die wie oben erläutert $\int K(x)dx = 1$ erfüllen. Der Kern K wird an jedem der n Datenpunkte x realisiert und die Kerne schließlich aufsummiert. Die Funktion wird dazu an m Stützstellen X diskretisiert. Die mit Kern K_h und Bandbreite h geschätzte Dichte an der Stützstelle X ist somit definiert als

$$\hat{p}(X, h) = n^{-1} \sum_{i=1}^n K_h(X - x_i).$$

Nur bei richtig gewählter Bandbreite h approximiert die geschätzte Dichte die wahre Dichte hinreichend genau. Eine zu groß gewählte Bandbreite führt zu einer zu starken Glättung (oversmoothing) der Schätzung; eine zu geringe Bandbreite führt hingegen zu Artefakten (undersmoothing).

Im Folgenden werden Gauß-Kerne zur Schätzung verwendet, sodass die Bandbreite h des Kerndichteschätzers der Standardabweichung σ entspricht. Die Bandbreite wird für jede Schätzung entsprechend der Daten optimiert (Benoudjit et al., 2002).

Da die Dichte metrischer Maße geschätzt wird, sind die Stützstellen im Abstand von 1 cm über das zu analysierende Datenintervall verteilt. Die Anzahl der Stützstellen variiert somit.

2.2.2 Geometrische Modellierung

Für die geometrische Beschreibung dreidimensionaler Objekte werden zumeist die Konzepte *Constructive Solid Geometry* (CSG, Mäntylä, 1988) oder *Boundary Representation* (B-Rep, Foley et al., 1996) verwendet.

Constructive Solid Geometry

CSG-Modelle werden durch die Anwendung mengentheoretischer Operationen wie Vereinigung, Schnitt oder Differenz auf geometrische Primitive definiert. So ließe sich beispielsweise aus der Vereinigung zweier Quader ein L-förmiger Volumenkörper erzeugen. Wird die Oberfläche beide Quader als nichttransparent angenommen, so ist es für die grafische Repräsentation des Objekts unerheblich, ob sich die beiden Quader durchdringen oder nur berühren. Beispielsweise nutzen die Standards Virtual Reality Modeling Language (VRML, International Organization for Standardization, 2004) sowie X3D (International Organization for Standardization, 2009) das CSG-Konzept zur Modellierung der Szenen.

Boundary Representation

In B-Rep hingegen werden Objekte ausschließlich durch ihre begrenzende Oberfläche definiert. Die B-Rep-Modellierung wird hauptsächlich für die Modellierung von Volumenkörpern verwendet. Einige Arbeiten erlauben auch die Modellierung von Oberflächen, ohne die vollständige Beschreibung eines Volumenkörpers zu fordern. Die Modellierung von Geländeoberflächen durch triangulierte Netze (TIN) entspricht diesem Konzept. Der oben erwähnte L-förmige Volumenkörper wird in B-Rep durch zwölf Punkte und achte planare Polygone definiert. B-Rep findet unter anderem bei CityGML (Gröger et al., 2008), dem internationalen Standard zur Beschreibung von 3D-Stadtmodellen, Anwendung. Dort wird die Geometrie sämtlicher Objekte als B-Rep modelliert.

2.2.3 Erfassung von 3D-Punktwolken

3D-Punktwolken stellen eine Diskretisierung kontinuierlicher Oberflächen, beispielsweise von Gebäudefassaden, durch einzelne Punkte mit dreidimensionalen Koordinaten dar. In Abhängigkeit vom eingesetzten Messverfahren können Lagegenauigkeiten der Punkte von weniger als 1 mm erreicht werden. Die erzielte Punktdichte ist grundsätzlich von der Objektdistanz abhängig; ein mittlerer Punktabstand von weniger als 1 cm ist in der Regel realisierbar.

Die zwei am weitesten verbreiteten sowie wirtschaftlichsten Verfahren zur Erfassung von 3D-Punktwolken sind *Laserscanning* und solche Verfahren, die auf der Interpretation von Mehrbildszenen basieren. Letztere werden als *Multi View Stereo* (MVS) Verfahren bezeichnet und sind erst in jüngster Zeit so leistungsfähig geworden, dass die Auflösung und Genauigkeit der berechneten 3D-Punktwolken mit denen von Laserscannern vergleichbar ist. Implementierungen sowie Daten der MVS-Verfahren standen für diese Arbeit jedoch nicht zur Verfügung und wurden somit nicht verwendet.

Im Folgenden werden unterschiedliche Verfahren des Laserscannings kurz erläutert.

Laserscanning

Laserscanning, das auch als LIDAR (Light Detection and Ranging) bezeichnet wird, ist ein Verfahren zur Erfassung von Oberflächen. In einem Laserscanner wird ein Laserstrahl durch einen Mechanismus auf die zu erfassende Oberfläche projiziert, dort reflektiert, um schließlich im Laserscanner detektiert zu werden. Die Projektionsmechanismen werden meistens durch oszillierende oder rotierende Spiegel realisiert. Die für diese Arbeit relevanten Messmethoden basieren auf der Laufzeit- oder Phasenmessung von nicht sichtbaren Laserstrahlen im Wellenlängenbereich von 400 nm bis 1600 nm. Weitere Details bietet der einführende Aufsatz von Beraldin et al. (2010).

Die Technik des Laserscanning kann sowohl aus der Luft (*airborne Laserscanning, ALS*) von fliegenden Plattformen wie Flugzeugen oder Hubschraubern als auch vom Boden (*terrestrisches Laserscanning, TLS*) erfolgen. Beim terrestrischen Laserscanning ist zwischen bewegten Plattformen (*mobile mapping* oder *mobiles Laserscanning, MLS*), z.B. Auto oder Zug, und unbewegten Plattformen (*statisch*) zu unterscheiden.

Luftgestützte Verfahren werden häufig zur kleinmaßstäbigen Vermessung verwendet und haben sich seit langem zur Erfassung der Datengrundlage zur Erstellung von digitalen Oberflächen- und Geländemodellen (DOM, DGM Sithole und Vosselman, 2004) bewährt. Auch die Rekonstruktion von Gebäudegrundrissen einschließlich ihrer Dachstruktur (Brenner, 2010) basiert auf diesen Laserscans. Dementsprechend werden terrestrische Verfahren zur Erfassung großmaßstäbiger Gebiete eingesetzt.

Durch mobile mapping (Kutterer, 2010) kann beispielsweise der vom öffentlichen Verkehrsraum einsehbare Bereich einer ganzen Stadt innerhalb weniger Tage erfasst werden. Eine Genauigkeitsbetrachtung und die Übersicht über verschiedene, für die kommerzielle Erfassung im Einsatz befindliche Plattformen gibt (Barber et al., 2008). Typische Produkte, die aus diesen Daten abgeleitet werden, sind beispielsweise Fachkataster für Bäume (Rutzinger

et al., 2010), Verkehrszeichen (Hunter, 2009) oder die Rekonstruktion von Gebäudefassaden (Becker, 2009).

Wegen der höheren Punktdichte und Genauigkeit, aber auch wegen der Größe des zu vermessenden Objekts, werden statische Verfahren für eine Vielzahl von Objekten eingesetzt. Die Anwendungen reichen von der Erfassung von Industrieanlagen (Rabbani, 2006) über geomorphologische Anwendungen (Prokop und Panholzer, 2009) bis hin zur Rekonstruktion und Dokumentation des Kulturerbes (Yastikli, 2007; Neubauer et al., 2005).

Verdeckungen

Um Verdeckungen in der Aufnahmegeometrie zu reduzieren, sind MLS-Plattformen für gewöhnlich mit mehreren Laserscannern ausgestattet, die in Bewegungsrichtung der Plattform vorwärts und rückwärts ausgerichtet sind.

Bei der statischen Erfassung werden Verdeckungen aufgrund von Vegetation oder vorstehender Gebäudeteile durch die Aufnahme von mindestens zwei Standpunkten eliminiert. Alle so aufgenommenen 3D-Punktwolken werden über Passpunkte, die durch spezielle Zielmarken in der aufzunehmenden Szene realisiert werden, in ein gemeinsames Koordinatensystem überführt (*Registrierung*). Hier ist insbesondere der ICP Algorithmus (Iterative Closest Point) von großer Bedeutung (Rusinkiewicz und Levoy, 2001).

Transmission

Aufgrund der verwendeten Wellenlängen wird das Laserlicht von Glas nicht reflektiert, sondern transmittiert. Dies führt bei hoch aufgelösten 3D-Punktwolken von Fassaden dazu, dass in Bereichen von Fenstern nicht die Glasscheibe durch Punkte beschrieben wird, sondern die dahinter liegenden Vorhänge oder gar Objekte im Innern des Raumes. In der 3D-Punktwolke, die in Abbildung 2.3 (S. 11) dargestellt ist, sind rechts „neben“ dem Gebäude Teile der Innenwände zu sehen, die durch die Fenster gemessen wurden.

2.2.4 Analyse von 3D-Punktwolken

Im nachfolgenden Abschnitt werden Verfahren zur Analyse von 3D-Punktwolken vorgestellt. Nach einer Übersicht über Methoden der Clusteranalyse wird am Beispiel des RANSAC-Algorithmus das hypothesize-and-verify Paradigma erläutert. Zunächst werden jedoch die schon in der Einleitung genannten Begriffe entsprechend ihrer Verwendung in dieser Arbeit erläutert.

Mustererkennung beschäftigt sich mit der Suche von Mustern und Ähnlichkeiten in Daten wie beispielsweise der Gesichtserkennung in Bildern, der Spracherkennung zur Ableitung von Text aus gesprochener Sprache oder der Identifikation von Öffnungen in 3D-Punktwolken von Fassaden. Dazu werden die zu identifizierenden Objekte auf typische und möglichst eindeutige Merkmale abgebildet und durch geeignete Datenstrukturen wie *Merkmalsvektoren* beschrieben. Die Gesamtheit der Merkmalsvektoren spannt dann den *Merkmalsraum* auf. Bishop (2006) nennt stellvertretend für die lange Historie der Mustererkennung Tycho Brahe und Kepler, deren astronomischen Gesetze ein Versuch sind, die in Experimenten beobachteten Muster zu erklären.

Klassifikation Als Teilbereich der Mustererkennung beschäftigt sich die Klassifikation (Klassifizierung) mit der Einteilung der zu analysierenden Daten in Klassen sowie der Identifikation von Charakteristika, die für die jeweiligen Klassen typisch sind. Die Trennung der Daten wird anhand diskriminativer Eigenschaften im (oftmals höherdimensionalen) Merkmalsraum durchgeführt. Abhängig davon, ob die Klassen vorab bekannt sind, wird zwischen *überwachten* und *unüberwachten* Klassifikationsverfahren unterschieden. Beispielsweise zählen Entscheidungsbäume (s. Abschnitt 4.1.1) zu den überwachten und die Clusteranalyse (s. Abschnitt 2.2.4) zu den unüberwachten Klassifikationsverfahren.

Rekonstruktion bezeichnet die Bestimmung der Parameter gegebener Modelle aus unvollständigen Daten. Im Allgemeinen wird der Begriff sowohl für den Vorgang als auch das Ergebnis der Schätzung verwendet. In dieser Arbeit wird die Rekonstruktion der Lage- und Formparameter von Fassadenteilen aus 3D-Punktwolken thematisiert.

Da das rekonstruierte Objekt häufig einfacher kodiert werden kann als dessen Diskretisierung durch die Beobachtungen, geht mit der Rekonstruktion häufig auch eine erhebliche Datenreduktion einher. So zeichnen sich virtuelle 3D-Gebäudemodelle in B-Rep gegenüber 3D-Punktwolken durch einen Bruchteil an Parametern aus, die zur Beschreibung des Gebäudes notwendig sind.

Interpretation subsumiert Verfahren, welche die Semantik der Eingangsdaten ergründen. Die Interpretation von Daten kann sowohl auf Klassifikationsverfahren als auch auf Rekonstruktionsverfahren basieren. Häufig ist die Bedeutung eines Objekts bereits durch die zugewiesene Klasse oder das geschätzte Modell gegeben. Andernfalls sind weitere Klassifikationen notwendig, um Relationen zu anderen Objekten herzustellen. Die Betrachtung des Kontextes, also der benachbarten Objekte, ist hier von besonderer Bedeutung. Beispielsweise kann ein Verfahren zur Interpretation von 3D-Punktwolken von Fassaden Löcher in den Punktwolken nur dann als Fenster identifizieren, wenn sie von Mauern o.ä. umgeben sind.

Wegen der zusätzlich notwendigen Analyse der Relationen zu anderen Objekten ist die Interpretation eines Datensatzes zumeist komplexer als seine Klassifikation. Die Interpretation muss nicht zwingend auch eine Rekonstruktion beinhalten.

Im einfachsten Fall wird das verwendete Modellwissen bei der Interpretation von 3D-Punktwolken auf die Punktdichte beschränkt und es werden Teilmengen der 3D-Punktwolke bestimmt, die sich durch ihre homogene Punktdichte auszeichnen. Aus diesem Grund wird diese Art der Rekonstruktion hier als *Analyse geometrischer Eigenschaften* bezeichnet. In diesem Umfeld haben sich eine Reihe von Methoden etabliert, die im Folgenden vorgestellt werden.

Clusteranalyse

Clusteranalyse bezeichnet unüberwachte Klassifikationsverfahren, welche die Eingangsdaten automatisch und ohne vorab bekannte Klassen segmentieren. Clusteranalyse kann sowohl im Parameter- als auch im Merkmalsraum durchgeführt werden. Bei der Clusteranalyse geometrischer Daten wird eine Gruppe zumeist durch die Ähnlichkeit der Daten untereinander oder durch die Ähnlichkeit zu einem Centroid definiert. Als Ähnlichkeitsmaß wird ein Distanzmaß – häufig die euklidische Distanz – gewählt.

Der *k-means* Algorithmus (Bishop, 2006) weist jeden Punkt dem ihm am nächsten gelegenen Centroid zu. Nach der initialen, zufälligen Vorgabe der k Centroide werden diese aus den ihnen zugewiesenen Punkten neu berechnet. Das Verfahren iteriert bis zur Konvergenz der Position der Centroide. Die Anzahl der Cluster bzw. Centroide k muss vorgegeben werden.

Der *x-means* Algorithmus (Pelleg und Moore, 2000) ist eine Erweiterung des *k-means* Algorithmus. Die Zahl der Centroide muss hier nicht vorgegeben, sondern lediglich durch eine obere Schranke begrenzt werden. Iterativ wird die Zahl der Centroide erhöht und mittels des Bayes'schen Informationskriteriums (BIC) die optimale Zahl an Centroiden ermittelt. Dieses Vorgehen ist eingebettet in die iterative Struktur des *k-means* Algorithmus zur Suche der optimalen Centroide.

Aus der Definition der Cluster über ihre Centroide ergeben sich einige Nachteile. Beispielsweise werden so nur sphärische Cluster gefunden. Der *db-scan* Algorithmus (Ester et al., 1996) hingegen kann aufgrund der ihm zugrunde liegenden Definition von Dichte beliebig geformte Cluster finden. Der Algorithmus analysiert die ϵ -Umgebung eines Punktes und die darin enthaltenen Nachbarn. Liegt die Anzahl der Nachbarn über einem gegebenen Grenzwert m , so werden der Punkt und seine Nachbarn einem Cluster zugeordnet. Die in der ϵ -Umgebung liegenden Nachbarn werden ebenso analysiert, was bei genügend vielen Punkten in deren ϵ -Umgebung zu einem „Wachsen“ des Clusters führt. Kann ein Cluster nicht weiter wachsen, so wird versucht ausgehend von einem bisher nicht betrachteten Punkt ein neues Cluster zu finden. Nach Durchlauf des Algorithmus sind alle Punkte entweder einem Cluster zugeordnet oder als Rauschen identifiziert worden. Der Algorithmus ist deterministisch bei gegebenem Radius ϵ und Mindestanzahl von Nachbarn m .

Der Clusteranalyse von 3D-Punktwolken von Fassaden liegt die implizite Annahme (s.g. *inductive bias*) zugrunde, dass dicht beieinander liegende Punkte das selbe Objekt beschreiben.

Die *Hough Transformation* (Duda und Hart, 1972) ist eine Art der Clusteranalyse im Parameterraum und wird häufig verwendet, um geometrische Primitive wie Geraden oder Kreise in Bildern zu finden.

Vosselman (1999) beschreibt ein ähnliches Vorgehen zur Detektion von Ebenen in 3D-Punktwolken. In dem von ihm vorgestellten Verfahren werden Cluster im Raum der Ebenenparameter in Hesseform gesucht. Die Ebenen werden durch die Dreiecke einer Delaunay-Triangulation (Klein, 2005) definiert. Aufgrund des Delaunay-Kriteriums befinden sich im Umkreis eines Dreiecks keine weiteren Punkte. So werden unter Berücksichtigung des Prinzips der Nachbarschaft alle möglichen Ebenen betrachtet.

Alternativ zur Definition der Ebenen durch die Dreiecke eines TINs (Triangular Irregular Network) wird häufig auch die *Hauptkomponentenanalyse* (Principle Component Analysis, PCA, Bishop, 2006) angewendet, um für jeden Punkt der 3D-Punktwolke aus den n nächsten Nachbarn die Normalenrichtung zu schätzen. Zwar ist die Bestimmung der n nächsten Nachbarn aufwendig, im Gegensatz zum Verfahren von Vosselman sind die durch die PCA geschätzten Ebenen für $n \gg 3$ robuster und daher weniger anfällig für lokale Strukturen in den Daten, sodass die Datenpunkte im Merkmalsraum weniger stark streuen.

Der RANSAC-Algorithmus

RANSAC (Random Sample Consensus, Fischler und Bolles, 1981) ist ein Algorithmus zur robusten Schätzung parametrischer Modelle aus verrauschten Daten mit einer großen Zahl von Ausreißern. RANSAC folgt dem *hypothesize-and-verify* Paradigma, das von einer Reihe weiterer Arbeiten und auch von dem in Abschnitt 4.1 (S. 59) vorgestellten MOSAP-Algorithmus aufgegriffen wird. Entsprechend diesem Paradigma werden nach einem gegebenen Schema Modellhypothesen aufgestellt und verifiziert. Die bei Erfüllung des Abbruchkriteriums am besten bewertete Modellhypothese wird schließlich gewählt.

```
1 function [mBest, CBest] = ransac(D, M, n, k, e, d) {
2   input :
3     D    // Daten – eine Menge von Beobachtungen
4     M    // Modell, dessen Parameter zu schätzen sind
5     n    // Größe eines Samples
6     k    // Maximale Anzahl an Iterationen
7     e    // Maximaler Abstand eines Inliers vom Modell
8     d    // Mindestzahl von Inliern für ein gutes Modell
9   output :
10    mBest // Modellinstanz mit größtem Consensus Set
11    CBest // Consensus Set für mBest
12
13   i = 0
14   cBest = 0
15
16   while ( i < k ) {
17     s = n zufällig ausgewählte Elemente aus D
18     m = aus s und M berechnete Modellinstanz
19     C = Beobachtungen, deren Abstand zu m kleiner ist als e
20     c = Größe von C
21
22     if( c > d && c > cBest) {
23       mBest = m
24       CBest = C
25     }
26
27     i++
28   }
29
30   return mBest, CBest
31 }
```

Listing 2.1: Pseudocode des RANSAC Algorithmus

Listing 2.1 zeigt den RANSAC-Algorithmus im Pseudocode. Nach der Initialisierung der Variablen (Zeilen 13 – 14) wiederholt der Algorithmus k mal die zufällige Wahl einer Modellinstanz m (Zeilen 17 – 18) sowie deren Bewertung (Zeilen 19 – 20). Wird in einem Durchlauf ein besseres als das bisher bekannte beste Modell gefunden, so wird es ersetzt

(Zeilen 23 – 24), falls seine Güte c über dem vorgegebenen Grenzwert d liegt (Zeile 22). Schließlich wird die beste gefundene Modellinstanz $mBest$ zurückgegeben.

Zur Bewertung des Modells wird für jeden Datenpunkt aus D geprüft, ob er weiter als der gegebene Abstand e von der Modellinstanz entfernt liegt. Alle Punkte, die näher als e an m liegen, werden dem *Consensus Set* C hinzugefügt – sie werden auch als *Inlier* bezeichnet. Die Anzahl der Inlier c wird als Gütemaß der Modellinstanz verwendet. Das Ergebnis des Algorithmus ist stets eine Dichotomie der Eingangsdaten D in die *Inlier* Menge $CBest$ sowie die *Outlier* Menge $D \setminus CBest$.

Der RANSAC-Algorithmus wird lediglich zur entsprechenden Segmentierung der Eingangsdaten eingesetzt und stets durch eine optimale Schätzung, z.B. Minimierung der Residuenquadrate ergänzt.

Die zentralen Stellen des Algorithmus sind *hypothesize*: das Sampling (Zeile 17) sowie *verify*: die Abstandsberechnung (Zeile 19) und die Bewertung der Modellinstanz (Zeile 20). Sie definieren auch die Effizienz des Algorithmus: Der RANSAC-Algorithmus ist dann effizient, wenn (1) sich das gegebene Modell durch ein Sample geringer Größe instanziiieren lässt und (2) die Distanzfunktion einfach zu berechnen ist. Dies sei kurz erläutert: (1) Steigt die Anzahl der zur Instanziiierung notwendigen Datenpunkte, so führt dies zu einer deutlich höheren Zahl notwendiger Iterationen. (2) Die Abstandsberechnung wird $k(|D| - n)$ Mal durchgeführt. Ist sie aufwendig zu berechnen, so verlängert sich die Laufzeit des Algorithmus enorm.

Viele Arbeiten modifizieren daher eine der oben genannten Stellen: Torr und Zisserman (2000) führen mit MLESAC die Bewertungsfunktion $f(x)$ ein, die alle Inlier mit dem quadrierten Abstand zum Modell a^2 und alle Outlier mit dem quadrierten maximalen Abstand e^2 gewichtet. Es ergibt sich das Gütemaß c zu

$$c = \sum_i f(a) \quad \text{mit} \quad f(a) = \begin{cases} a^2, & \text{wenn } a^2 < e^2 \\ e^2, & \text{wenn } a^2 \geq e^2. \end{cases}$$

Schnabel et al. (2008) und Wahl et al. (2005) präsentieren Verfahren, die auf zufälligem, *lokalem* Sampling basieren. Rodehorst und Hellwich (2006) kombinieren RANSAC mit genetischen Algorithmen.

2.2.5 Formale Grammatiken

In diesem Abschnitt werden die theoretischen Grundlagen und Konzepte formaler Grammatiken vorgestellt. Nach den grundlegenden Definitionen werden *Attributgrammatiken* als Erweiterungen formaler Grammatiken erläutert und ihre Relevanz für diese Arbeit diskutiert. Abschließend werden *Shape-Grammatiken* und *L-System* als frühe Arbeiten zur Modellierung von Formen mit Grammatiken vorgestellt.

Definition 2.1 (Grammatik). *Eine Grammatik G ist ein Quadrupel $G = \{N, T, S, P\}$ bestehend aus*

- einer nicht leeren, endlichen Menge von Nichtterminalsymbolen N ,

- einer nicht leeren, endlichen Menge von Terminalsymbolen T mit $N \cap T = \emptyset$,
- einem Startsymbol $S \in N$ und
- einer nicht leeren, endlichen Menge von Produktionsregeln P der Form $(N \cup T)^* \rightarrow (N \cup T)^*$.

$(N \cup T)^*$ bezeichnet hier den *Kleene'schen Abschluss*, (Aho et al., 1999) der Vereinigungsmenge der Terminal- und Nichtterminalsymbole, also die null- oder mehrmalige Konkatenation beliebiger Symbole. Diese Menge beinhaltet demnach auch das leere Symbol ϵ . Der *positive Abschluss* A^+ hingegen schließt das leere Symbol aus.

Listing 2.2 zeigt die Definition der Grammatik G_t zur Repräsentation von Treppen. Wie in Listing 2.2 werden in dieser Arbeit die Namen für Symbole wie folgt verwendet: Namen, die mit Kleinbuchstaben beginnen (`auftritt`) zur Bezeichnung von Terminalsymbolen und Namen, die mit Großbuchstaben beginnen (`Treppe`) zur Bezeichnung von Nichtterminalsymbolen. Das `|` Zeichen trennt alternative rechte Seiten einer Produktionsregel: Die erste Zeile der Produktionsregeln entspricht demnach den beiden Produktionsregeln `Treppe → steigung auftritt Treppe` und `Treppe → steigung podest Treppe`.

```

T = {auftritt, steigung, podest}
N = {Treppe}
S = Treppe
P = {Treppe → steigung auftritt Treppe | steigung podest Treppe ,
     Treppe → steigung auftritt
}

```

Listing 2.2: Grammatik G_t zur Modellierung einer Treppe

Definition 2.2 (Alphabet). *Das Alphabet $A(G)$ einer Grammatik G ist die Gesamtheit aller Symbole.*

$$A(G) = T \cup N$$

Das Alphabet der Treppengrammatik ist also $A(G_t) = \{ \text{auftritt, steigung, podest, Treppe} \}$.

Definition 2.3 (Sprache). *Die durch eine Grammatik G definierte Sprache $L(G)$ ist die Menge aller Worte, die ausschließlich aus Terminalsymbolen bestehen und durch endlich häufige Anwendung der Produktionsregeln aus dem Startsymbol abgeleitet werden können.*

$$L(G) = \left\{ w \in T^* \mid S \xrightarrow{*} w \right\}$$

Die Grammatik G_t definiert die Sprache zur Beschreibung von Treppen unter Verwendung der in Abschnitt 3.2.3 vorgestellten Begriffe. Das kürzeste Wort der Treppensprache ist `auftritt steigung`.

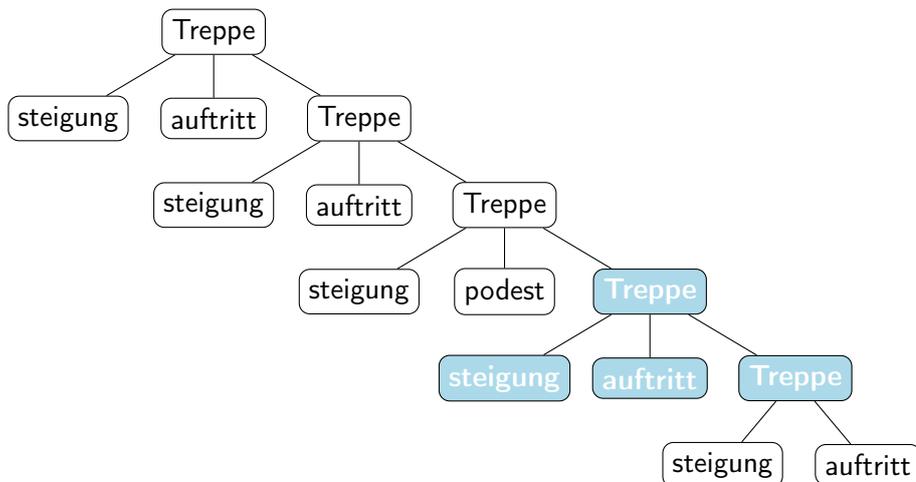


Abbildung 2.5: Ableitungsbaum eines Wortes der Treppensprache. Der blau markierte Teilbaum wurde durch Anwenden der folgenden Produktionsregel erzeugt:
 $\text{Treppe} \rightarrow \text{steigung auftritt Treppe}$

Definition 2.4 (Ableitungsbaum). *Ein Ableitungsbaum ist die baumartige Darstellung der Herleitung (Ableitung) eines Wortes der durch G definierten Sprache $L(G)$. Die Wurzel des Ableitungsbaums entspricht dem Startsymbol S , die Blätter enthalten ausschließlich Terminalsymbole. Jeder Teilbaum der Tiefe 1 repräsentiert eine Produktionsregel derart, dass die Wurzel des Teilbaums dem Symbol der linken Seite der Produktionsregel entspricht und seine Nachfolger den Symbolen der rechten Seite der Produktionsregel entsprechen.*

Werden beim Tiefendurchlauf durch einen Ableitungsbaum nur die Blattknoten ausgegeben, so entspricht die Ausgabe dem Wort, das durch den Ableitungsbaum repräsentiert wird. Zusätzlich zu diesem Wort repräsentiert der Ableitungsbaum den gesamten Herleitungsprozess des Wortes aus dem Startsymbol S (Wurzelknoten).

Abbildung 2.5 zeigt beispielhaft den Ableitungsbaum eines Wortes der Treppensprache. Das Wort beschreibt eine Treppe aus vier Auftritt-Steigung-Paaren, also vier Stufen, in deren Mitte sich nach zwei Stufen ein Podest befindet. Der blau markierte Teilbaum wurde durch Anwenden der Produktionsregel $\text{Treppe} \rightarrow \text{steigung auftritt Treppe}$ erzeugt.

Hier wird der Vorteil, Grammatiken zur Modellierung der Realwelt zu verwenden, offensichtlich. Die enorme Generizität macht es möglich, mit kompakten Beschreibungen, wie der Definition einer Grammatik mit drei Produktionsregeln, eine umfangreiche Sprache zu beschreiben. Wegen der hier verwendeten rekursiven Regeln ist die definierte Sprache unendlich groß.

Typisierung von Grammatiken

Erste Definitionen formaler Grammatiken gehen auf Chomsky (1955, 1956) zurück, der sie zur Beschreibung natürlicher Sprachen verwendete. Die Typen der nach ihm benannten

Chomsky-Hierarchie unterscheiden sich ausschließlich in der Form ihrer Produktionsregeln. Chomsky definierte *reguläre*, *kontextfreie*, *kontextsensitive* und *beliebige* (Typ3 – Typ0) Grammatiken, die entsprechend vier Typen von Sprachen definieren.,

Zur Modellierung geometrischer Objekte mit formalen Grammatiken in Abschnitt 5.2.2 genügt die Ausdrucksstärke *kontextfreier*, Typ2 Grammatiken (s.u.). Daher wird hier auf die Definition der übrigen Typen verzichtet.

Definition 2.5 (Typ2 - kontextfreie Grammatik). *Eine Typ2 (kontextfreie) Grammatik hat ausschließlich Produktionsregeln der Form*

$$B \rightarrow \alpha$$

mit $B \in N$ und $\alpha \in A^*$.

Auch die in Listing 2.2 gezeigte Grammatik ist kontextfrei.

Von Typ3 zu Typ0 nimmt die Ausdrucksstärke der Grammatiken zu. Anschaulich lässt sich die Ausdrucksstärke der verwendeten kontextfreien Grammatiken durch folgende Beispiele zeigen:

- Typ2-Grammatiken können Sprachen für Pallindrome – das sind Worte, die von rechts nach links und von links nach rechts gelesen identisch sind – definieren. Reguläre Grammatiken reichen hierzu nicht aus.

Bespiel: Die Sprache $\{a^n b^m a^n \mid m, n \in \mathbb{N}^{>0}\}$ (Sprachen, deren Worte aus b 's bestehen, die links und rechts von der gleichen Anzahl a 's eingeschlossen sind) wird durch die Produktionsregeln $A \rightarrow a A a$ sowie $A \rightarrow b$ definiert.

- Sprachen wie $\{a^n b^n c^n \mid n \in \mathbb{N}^{>0}\}$ (Sprachen, deren Worte durch die Aneinanderreihung gleich vieler a 's, b 's und c 's gebildet werden) können nicht von Typ2-Grammatiken definiert werden. Hier sind kontextsensitive Grammatiken notwendig.

Probabilistische Grammatiken

Häufig definieren mehrere Produktionsregeln einer kontextfreien Grammatik mögliche Ableitungen desselben Nichtterminalsymbols (vgl. Listing 2.2). Tritt dieses Symbol als Blatt im Ableitungsbaum auf, so muss eine der anwendbaren Regeln ausgewählt werden. Offen ist jedoch das Kriterium, nach dem eine Regel einer anderen vorgezogen wird. Probabilistische Grammatiken (Fu, 1982; Geman und Johnson, 2002) erweitern das Konzept formaler Grammatiken um ein wahrscheinlichkeitstheoretisches Kriterium für Produktionsregeln.

Definition 2.6 (Probabilistische Grammatik). *Eine probabilistische Grammatik ist eine Grammatik deren Produktionsregeln P derart um Wahrscheinlichkeiten p ergänzt werden, dass jeder Produktionsregel $r_i \in P$ eine Wahrscheinlichkeit p_i zugewiesen wird. Die Wahrscheinlichkeiten aller Produktionsregeln P_j mit $j \in [1, n]$ mit identischem Nichtterminal auf der linken Seite summieren zu 1*

$$\sum_j p_j = 1.$$

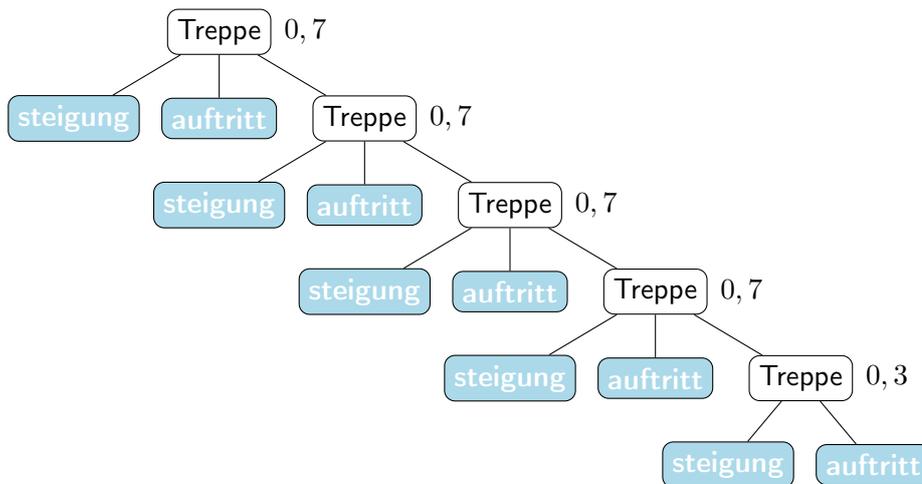


Abbildung 2.6: Ableitungsbaum: Das abgeleitete Wort einer Treppe mit fünf Stufen (hellblaue Terminalsymbole) hat eine Wahrscheinlichkeit von 0,07203.

Definiert eine probabilistische Grammatik G_p die Sprache $L(G_p)$, dann ergibt sich die Wahrscheinlichkeit eines Wortes w der Sprache aus dem Produkt der Wahrscheinlichkeiten aller zur Ableitung angewendeten Produktionsregeln $P_m \subseteq P$:

$$p(w) = \prod_m p_m.$$

Listing 2.3 erweitert Produktionsregeln der Treppengrammatik G_t aus Listing 2.2 um Wahrscheinlichkeiten. Der in Abbildung 2.6 gezeigte Ableitungsbaum stellt neben den produzierten Symbolen auch die Wahrscheinlichkeit jedes Ableitungsschrittes dar. Für das abgeleitete Wort einer Treppe mit fünf Stufen ergibt sich eine Wahrscheinlichkeit von $p = 0,7 \cdot 0,7 \cdot 0,7 \cdot 0,7 \cdot 0,3 = 0,07203$.

```

T = {auftritt, steigung}
N = {Treppe}
S = Treppe
P = { Treppe  $\xrightarrow{0,7}$  steigung auftritt Treppe
      Treppe  $\xrightarrow{0,1}$  steigung podest Treppe
      Treppe  $\xrightarrow{0,2}$  steigung auftritt
    }

```

Listing 2.3: Probabilistische Version der Treppengrammatik G_T aus Listing 2.2

Ripperda (2009) verwendet ebenfalls probabilistische Grammatiken zur Beschreibung von Fassaden. Hierzu weist sie jeder Produktionsregel die relative Häufigkeit der entsprechenden Regel in der manuell erfassten Datenbank von Produktionsregeln zu.

Attributierte Grammatiken

Knuth definierte 1968 zur Beschreibung der semantischen Struktur von Programmiersprachen das Konzept der *Attributgrammatiken*, welche die von Chomsky definierten kontextfreien Grammatiken erweitern. In der deutschsprachigen Literatur werden die Begriffe Attributgrammatik (z.B. Aho et al. (1999)) und *attributierte Grammatik* (z.B. Güting und Erwig (1999)) synonym für die von Knuth verwendete Bezeichnung *attribute grammar* benutzt. Im Folgenden werden ebenfalls beide Übersetzungen verwendet.

Definition 2.7 (Attributgrammatik). *Eine Attributgrammatik (attributierte Grammatik) ist eine kontextfreie Grammatik, deren Symbole durch Attribute $\{a_{ij} \mid i, j \in \mathbb{N}^{>0}\}$ und deren Produktionsregeln durch semantische Regeln $\{R_l(P_k) \mid k, l \in \mathbb{N}^{>0}\}$ ergänzt werden. Die semantischen Regeln haben die Form $a_1 = f(a_2 \dots a_m)$. Sind $a_1 \dots a_m$ Attribute der Symbole $B \in A$ der Produktionsregel $p \in P$, dann ist a_1 ein*

- **synthetisiertes** Attribut des Symbols B , falls B das Symbol der linken Seite der Produktionsregel p ist, oder
- **ererbtes** Attribut des Symbols B , falls B ein Symbol der rechten Seite der Produktionsregel p ist.

Synthetisierung und Vererbung ermöglichen die bidirektionale Wertzuweisung in semantischen Regeln. Die Attribute der linken und rechten Seite des Gleichheitszeichens einer semantischen Regel können den Wert vom Attribut der jeweils anderen Seite zugewiesen bekommen.

Anders als bei der Modellierung mit UML-Klassendiagrammen besteht durch Attributvererbung und -synthetisierung nicht nur die Möglichkeit, die Eigenschaften von Objekten durch Attribute auszudrücken, sondern auch deren funktionalen Zusammenhänge objektübergreifend zu repräsentieren. So sind Attribute und semantische Regeln hervorragend dazu geeignet, beispielsweise die Identität von Form- und Lageparametern auch für unterschiedliche Objekte sicher zu stellen. In Abschnitt 3.1 wird gezeigt, dass gerade Orthogonalität und Parallelität allgegenwärtige architektonische Prinzipien sind. Diese können mithilfe semantischer Regeln modelliert werden. Das folgende Beispiel beschreibt die Modellierung der Parallelität von Fassade und Treppe wie in Abbildung 2.7 dargestellt.

Listing 2.4 zeigt einen Ausschnitt der in dieser Arbeit erstellten Grammatik G_F zur Modellierung von Fassaden. Die weiteren Produktionsregeln sind in Listing 5.2 (S. 88) gezeigt. An dem Ausschnitt in Listing 2.4 wird im Folgenden das Konzept der Attributgrammatiken erläutert. Abbildung 2.8 zeigt einen (ebenso) unvollständigen Ableitungsbaum der Grammatik. Die weitere Ableitung der Nichtterminale ist durch Punkte angedeutet.

Die Semantik der verwendeten Symbole wird im Abschnitt 3.2 (S. 44) erläutert.

Hinweise zur Notation: Die hochgestellten Indizes der Symbole in Produktionsregeln und semantischen Regeln dienen der Unterscheidung gleicher Symbole innerhalb einer Regel.

Die Produktionsregeln sind in der Syntax P_1 (Produktionsregel Nr. 1), die semantischen Regeln in der Syntax $R_1(P_2)$ (Semantische Regel Nr. 1 der Produktionsregel Nr. 2) notiert. Attributenamen werden durch einen Punkt getrennt an den Namen des Symbols angehängt. Für Attributenamen wird kursive, für Symbolnamen Schreibmaschinenschrift verwendet: `Symbol.attribut`

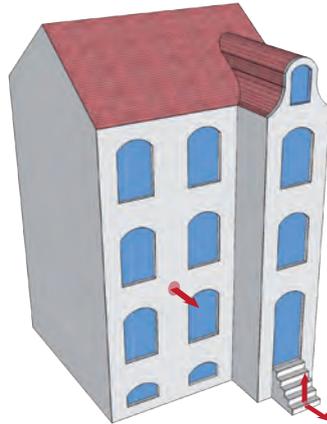


Abbildung 2.7: Identität der Normalenrichtung von Fassade und Treppe

```

1 T = {wand, tuer, auftritt, steigung, fensterraster}
2 N = {Erker, Fenster, Eingang, Treppe, Fensterraster}
3 S = Teilfassade
4 P = {
5   P10: Wand → wand Fensterraster
6   P12: Fensterraster → fensterraster Eingang
7   P14: Eingang → tuer Treppe
8   P17: Treppe → steigung auftritt Treppe1
9 }
10
11 R = {
12   R2(P10): Fensterraster.normale = Wand.normale
13   R1(P12): Eingang.normale = Fensterraster.normale
14   R1(P14): Treppe.normale = Eingang.normale
15   R1(P17): steigung.normale = Treppe.normale
16   R2(P17): steigung.normale = rotateX(Treppe.normale, -90)
17
18   R3(P17): auftritt.tiefe = Treppe.auftrittsTiefe
19   R4(P17): Treppe.auftrittsTiefe = Treppe1.auftrittsTiefe
20
21   R5(P17): Treppe.anzahlStufen = Treppe1.anzahlStufen + 1
22 }

```

Listing 2.4: Ausschnitt der attribuierten Grammatik G_F für Fassaden (vgl. Listing 5.2, S. 88).

Die Nummerierung der Produktionsregeln ist aus Listing 5.2 (S. 88) übernommen.

Die vier Produktionsregeln in den Zeilen 5 bis 8 modellieren Teile einer Fassade *vom Großen ins Kleine*, beginnend mit dem Symbol *Wand* bis hin zum Auftritt der Eingangstreppe. Die

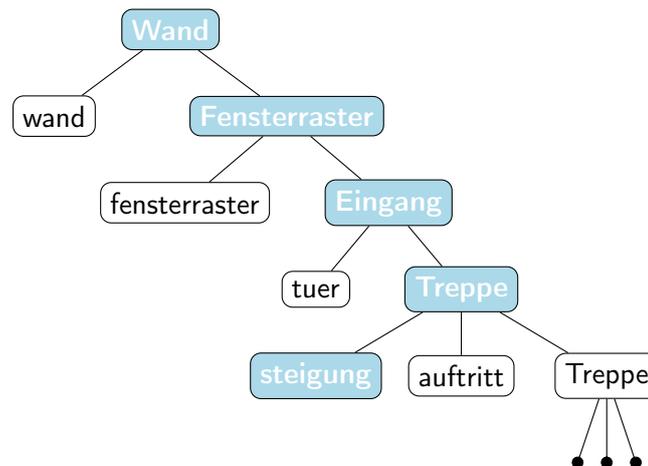


Abbildung 2.8: Ableitungsbaum der Fassadengrammatik aus Listing 2.4 (hellblauer Pfad zur Vererbung des Attributs *normale*)

Modellierung der Geometrie bleibt hier unberücksichtigt. Diese wird in Abschnitt 5.2.2 ausführlich erläutert.

Die sieben dargestellten semantischen Regeln spezifizieren die bidirektionale Propagierung von Attributwerten zwischen den Symbolen. Die ersten vier Regeln in Zeilen 12 bis 15 definieren die Vererbung des Attributs *normale* von der Teilfassade zur Treppe. Sie beschreiben also die Identität der Richtung der Flächennormalen der Fassade und der Steigungen. Daraus folgt, dass die Treppenstufen des Eingangs parallel zur Fassade verlaufen. In den Regeln $R_3(P_{17})$ und $R_4(P_{17})$ wird die Konstanz der Auftrittstiefe einer Treppenstufe innerhalb der Treppe modelliert. Schließlich zeigen die Regeln $R_2(P_{17})$ und $R_5(P_{17})$, dass neben einfachen Wertzuweisungen auch funktionale Zusammenhänge, wie die Rotation eines Vektors um -90° oder das Zählen der Stufen, realisiert werden können.

2.2.6 Zusammenfassung

In diesem Abschnitt wurden die theoretischen Grundlagen dieser Arbeit erläutert. Beginnend mit der probabilistischen Modellierung wurden auch die geometrische Modellierung dreidimensionaler Szenen, das Sensormodell terrestrischen Laserscannings sowie Methoden zur Analyse von 3D-Punktwolken vorgestellt und das Konzept formaler Grammatiken erläutert.

2.3 Literaturreview

Arbeiten über die spezielle Verwendung formaler Grammatiken zur Modellierung geometrischer Objekte werden in Abschnitt 2.3.1 vorgestellt. Es wird zwischen allgemeinen geometrischen Objekten sowie der Modellierung von Gebäuden unterschieden.

In Abschnitt 2.3.2 werden Arbeiten zur Rekonstruktion von Gebäuden und Fassaden diskutiert. Dort werden zunächst die Arbeiten vorgestellt, die keine grammatikbasierten Modelle verwenden, Letztere werden anschließend erläutert.

2.3.1 Arbeiten zu geometrischen Grammatiken

Nachfolgend werden Arbeiten vorgestellt, die Grammatiken zur Modellierung geometrischer Objekte sowie zur Repräsentation von Gebäuden und Gebäudeteilen verwenden.

Modellierung geometrischer Objekte

Im Folgenden werden Typen von Grammatiken erläutert, die zur Definition von geometrisch interpretierbaren Sprachen verwendet werden. Die Grammatiken werden auf einem Alphabet geometrischer Formen definiert oder operieren auf symbolischen Abstraktionen, welche die Geometrie der Symbole nur implizit repräsentieren.

Shape-Grammatiken Stiny und Gips (1972) führen das Konzept der Shape-Grammatiken zur formalen Beschreibung abstrakter Zeichnungen ein. Sie bezeichnen die Grammatiken als *shape grammars*. In deutschsprachigen Arbeiten werden neben der Begriff „Shape-Grammatik“, auch die Übersetzungen „Gestaltgrammatik“ oder „Formgrammatik“ verwendet. Im Folgenden wird jedoch der englisch-deutsche Begriff *Shape-Grammatik* gewählt.

Die Symbole einer Shape-Grammatik sind gezeichnete Formen und die Produktionsregeln beschreiben die Ersetzung eines Patterns durch ein anderes. Demnach kann eine Ableitung der Grammatik nicht durch einen Ableitungsbaum im üblichen Sinne beschrieben werden, sondern es werden die „Entwicklungsstadien“ der Zeichnung selber angegeben. Rotation, Spiegelung oder Skalierung der Patterns der linken Seite von anzuwendenden Produktionsregeln gegenüber der aktuellen Ableitung der Grammatik sind erlaubt und werden ebenso für die rechte Seite der Produktionsregeln angewendet. Um die Anzahl möglicher Rotationen einzuschränken werden die Patterns häufig mit Markern versehen, die eine eindeutige Rotation festlegen. Abbildung 2.9 zeigt die Regeln und Ableitungsschritte einer beispielhaften Shape-Grammatik. Eine Unterscheidung nach Terminal- und Nichtterminalsymbolen existiert nicht.

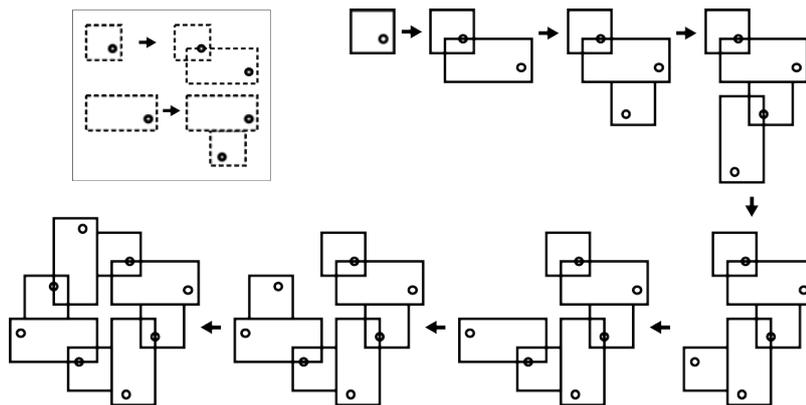


Abbildung 2.9: Sieben Ableitungsschritte einer Shape-Grammatik und die beiden Produktionsregeln im Kasten oben links (nach Knight, 1999)

Zwei grundlegende Probleme von Shape-Grammatiken werden in Abbildung 2.9 deutlich:

- **Mustererkennung:** Zur Auswahl aller auf eine Ableitung anwendbaren Regeln werden die Muster der linken Seiten aller Produktionsregeln in der aktuellen Ableitung gesucht. Die mögliche Rotation, Spiegelung und Skalierung der Muster erschwert deren Identifikation. In der Literatur wird dieses Problem als *subshape recognition* bezeichnend.
- **Terminierbarkeit:** Es kann außerdem nicht sicher gestellt werden, dass die gleiche Regel nicht mehrfach oder sogar unendlich oft auf das selbe Vorkommen des Musters in der jeweiligen Ableitung angewendet wird. Es fehlen – abgesehen von einer maximalen oder exakt vorgegebenen Anzahl von Ableitungsschritten – Kriterien zur Vermeidung von Endlosschleifen, also dem wiederholten zeichnen bereits vorhandener Muster.

In einer jüngeren Arbeit stellt Trescak et al. (2009) die Implementierung eines Interpreters für Shape-Grammatiken vor, der beide Probleme berücksichtigt.

In Anlehnung an die von Chomskys definierte Hierarchie formaler Grammatiken definiert Knight (1999) sechs Klassen von Shape-Grammatiken. Dabei thematisiert sie auch das Problem der Terminierbarkeit und definiert die Klasse *deterministischer Shape-Grammatiken* durch Restriktion sowohl der Form der Regeln als auch der Reihenfolge der Regelanwendung. Allerdings wird durch die von Knight genannten Restriktionen lediglich sicher gestellt, dass die Ableitung deterministisch ist, also bei jeder Ableitung das selbe Muster erzeugt wird. Unbeachtet bleibt jedoch, dass die Ableitung terminiert, also automatisch erkannt wird, dass keine weiteren Regelanwendungen mehr nötig sind, da sich das erzeugte Muster wiederholt bzw. überschreibt.

Krishnamurti und Earl (1992) zeigen, dass die Identifikation von Teilmustern im Zwei- und Dreidimensionalen nicht immer eindeutig lösbar ist. Sie skizzieren eine Methode zur Lösung des Problems und zeigen die dabei auftretenden und durch numerische Ungenauigkeiten entstehenden Probleme auf.

Seit der Einführung 1972 wurden eine Reihe von Shape-Grammatiken zur Beschreibung bestimmter Baustile oder Gebäude vorgestellt: Villen des italienischen Architekten Andrea di Pietro della Gondola (genannt Palladio) (Stiny und Mitchell, 1978), amerikanische Vorstadtbebauung des späten 19. (Flemming, 1987) und frühen 20. Jahrhunderts (Downing und Fleming, 1981), Prairie Houses des amerikanischen Architekten Frank Lloyd Wright (Koning und Eizenberg, 1981), traditionelle taiwanische (Chiou und Krishnamurti, 1995) oder türkische (Cagdas, 1996) Häuser oder die historische Altstadt von Marrakech, Marokko (Duarte et al., 2007). Es wurden aber auch Shape-Grammatiken für nicht-architektonische Objekte wie Harley-Davidson Motorräder (Pugliese und Cagan, 2002) oder Cola-Flaschen (Chau et al., 2004) vorgestellt.

Anders als die zuvor genannten Arbeiten, die häufig deterministisch waren oder manuell abgeleitet wurden, stellt Duarte (2002) eine Shape-Grammatik vor, die Teil eines interaktiven Systems zur synthetischen Generierung von Gebäudemodellen ist. Durch die manuelle Definition der Grammatik und die Integration von Heuristiken erzeugt das System ausschließlich solche Gebäude, wie sie vom portugiesischen Architekten Álvaro Siza in seinem bekannten Architekturprojekt „Quinta da Malagueira“ in Évora (Portugal) entworfen wurden.

Da Bedingungen nicht explizit repräsentiert werden können, sind Shape-Grammatiken nicht für die modellbasierte Rekonstruktion geeignet. Gerade das Bedingen der Regelauswahl das

Propagieren von Eigenschaften sowie die Definition von Abhängigkeiten zwischen Objekten sind wichtige Anforderungen an ein generisches Modell, das in einem Rekonstruktionsprozess einbezogen werden soll. Eine symbolische Repräsentation durch attributierte Grammatiken und eine dazu orthogonale Definition der Geometrie, wie sie in Abschnitt 5.2.2 beschrieben wird, eignet sich daher besser für die Verwendung in einem Rekonstruktionsprozess.

L-Systeme Lindenmayer führte 1968 ein mathematisches Modell zur Beschreibung von Pflanzenwachstum ein. Das vorgestellte Konzept beruht auf Termersetzungsgesetzen und war ursprünglich lediglich zur Modellierung der Topologie von Pflanzen gedacht. Das Konzept war frei von einer grafischen Interpretation der erzeugten Modelle und wurde später nach Lindenmayer benannt: Lindenmayer-Systeme (L-Systeme).

Wegen ihrer Art der regelbasierten Ersetzung sind L-Systeme auch eine Art von Grammatiken, die sich jedoch nicht in die Chomsky-Hierarchie einordnen lässt. Zwar lassen sich ebenfalls kontextsensitive und kontextfreie L-Systeme unterscheiden (Prusinkiewicz und Lindenmayer, 1991), jedoch stehen die Klassen kontextsensitiver und kontextfreier Grammatiken und L-Systeme in keiner Teilmengenbeziehung.

Der wesentliche Unterschied zwischen L-Systemen und Grammatiken der Chomsky-Hierarchie liegt in der Art der Regelanwendung. In einem Ableitungsschritt eines L-Systems werden alle Nichtterminalsymbole gleichzeitig ersetzt. Dieses Vorgehen ist dem natürlichen Wachstum von Pflanzen geschuldet, die wegen der fortwährenden Zellteilung in alle Richtungen und an allen Enden gleichzeitig wachsen. Die Ableitung eines L-Systems G_L beginnt mit dem Axiom $w \in L(G_L)$, einem beliebigen Wort der durch G_L definierten Sprache $L(G_L)$.

Ein weiterer zu vernachlässigender Unterschied liegt darin, dass L-Systeme formal nicht zwischen Terminal- und Nichtterminalsymbolen unterscheiden. Ein Symbol a eines L-Systems entspricht dann einem Terminalsymbol, wenn es keine Produktionsregel gibt, die dieses Symbol ersetzen kann. In diesem Fall wird in jedem Ableitungsschritt die identische Ersetzung $a \rightarrow a$ ausgeführt. Ebenso wie formale Grammatiken können auch L-Systeme durch Attribute und semantische Regeln parametrisiert oder durch das Hinzufügen von Wahrscheinlichkeiten zu Produktionsregeln erweitert werden.

Die geometrische Interpretation eines durch ein L-System erzeugten Wortes erfolgt häufig als sogenannte Turtle-Grafik. Die Symbole eines Wortes entsprechen Anweisungen, die den Weg einer Schildkröte (engl. turtle, vgl. Abelson und diSessa, 1986) spezifizieren und zeichnen. Ein solcher Weg ist gegeben durch gerade Kanten F und Richtungsänderungen $+$ und $-$ um einen bestimmten Betrag δ an den Endpunkten der Kanten. Listing 2.5 zeigt beispielhaft ein L-System. Wegen des Fehlens von Nichtterminalsymbolen wird die maximale Anzahl von Ableitungen n als explizites Abbruchkriterium angegeben.

Winkel: $\delta = 45^\circ$

Axiom: $w = F$

Produktionsregel: $F \rightarrow F[+F]F[-F]F$

Listing 2.5: L-System

In jedem Ableitungsschritt wird jedes Symbol F durch die rechte Seite der Produktionsregel ersetzt. Die eckigen Klammern dienen der Abbildung der zweidimensionalen Struktur des Baumes auf eine eindimensionale Zeichenkette. Sie kennzeichnen entsprechende Sprünge beim Zeichnen der Ableitung. $+F$ ist ein nach rechts wachsender Ast, der in jedem Ableitungsschritt weiter wächst. Abbildung 2.5 zeigt das Axiom (ganz links) und die ersten drei Ableitungsschritte des L-Systems.

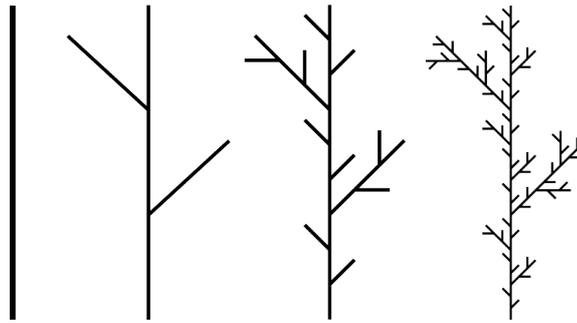


Abbildung 2.10: Grafische Darstellung des Axioms (ganz links) und der ersten drei Ableitungsschritte des L-Systems aus Listing 2.5. Die einzelnen Ableitungen sind jeweils auf 33 % der Voranstehenden skaliert.

Auch im Kontext von 3D-Stadtmodellen werden L-Systeme oder L-System-ähnliche Grammatiken zum Generieren von Pflanzen (Alsweis und Deussen, 2005; Deussen et al., 1998) oder synthetischer Straßennetze (Brown et al., 2009; Kelly und McCabe, 2007; Marvie et al., 2005; Parish und Müller, 2001) verwendet. Letztere setzen parametrisierte, stochastische L-Systeme auch zur Erzeugung von Gebäudemodellen ein.

Einige derartige Softwaresysteme erzeugen hochdetaillierte und fotorealistisch wirkende Szenen, die für Filme, Simulationen oder Computerspiele verwendet werden. Der Vorteil der so generierten Szenen liegt in deren Diversität, da die häufige Wiederholung prototypischer Pflanzenmodelle eine Szene künstlich erscheinen lassen würde.

L-Systeme werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht weiter verwendet. Einerseits entspricht die gleichzeitige Ableitung aller Nichtterminale, die für die Modellierung von Pflanzen durchaus sinnvoll ist, eben nicht der Entstehung von Gebäuden. Andererseits ist die geometrische Interpretation von L-System nicht zur Unterstützung eines Rekonstruktionsprozesses geeignet. Die Repräsentation der Geometrie durch eine lineare Zeichenfolge schränkt die Flexibilität der Modelle unnötig ein.

Modellierung von Gebäuden

Motiviert durch die zuvor aufgezeigten Arbeiten, die Gebäude(grundrisse) mit Shape-Grammatiken oder L-Systemen modellieren und synthetische Gebäudemodelle ableiten, wurden zunehmend Arbeiten veröffentlicht, die das Konzept kontextfreier Grammatiken (Chomsky Typ2) um die Möglichkeit der geometrischen Interpretation des abgeleiteten Wortes erweitern und so zur Modellierung von Gebäuden verwendet werden können.

In diesem Abschnitt steht die Modellierung von Gebäuden mit Grammatiken im Vordergrund. Die vorgestellten Grammatiken werden ausschließlich zum Generieren synthetischer Gebäude verwendet. Die Arbeiten zielen somit nicht auf die Interpretation von Messdaten ab, sondern auf die Erstellung realistischer Szenen. Ansätze, die Grammatiken für die Rekonstruktion von Gebäuden oder Gebäudeteilen nutzen, werden in Kapitel 2.3.2 diskutiert.

Split-Grammatiken Die ersten Schritte von Shape-Grammatiken hin zu symbolischen Repräsentationen machte Stiny (1982) selber. Er skizziert eine symbolische Darstellung der Formen von Shape-Grammatiken. Dabei versteht er Symbole und Produktionsregeln mengentheoretisch derart, dass Produktionsregeln Mengen von Symbol-Form-Paaren auf Mengen von Symbol-Form-Paaren abbilden. Stiny bezeichnet diese Art Grammatik als *Set-Grammatik*. Nach der Ableitung auf symbolischer Ebene werden die produzierten Symbole in ihre geometrische Form überführt. Gerade die für Shape-Grammatiken typischen Problemen (vgl. Abschnitt 2.3.1), die eine Computerimplementierung schwierig machen, entfallen und eine effiziente Implementierung wird möglich. Eine konkrete Anwendung wie die Gebäudemodellierung zeigt Stiny jedoch noch nicht auf.

2003 greifen Wonka et al. Stiny's Konzept der Set-Grammatiken auf und erweitern es für die besonderen Ansprüche der Modellierung von Gebäudefassaden. Wegen der im Folgenden näher erläuterten Art der Produktionsregeln bezeichnen sie ihr Konzept als *Split-Grammatik*.

Wie von Stiny eingeführt, repräsentieren die Symbole der Grammatik geometrische Formen. Jedoch verallgemeinern Wonka et al. diese zu primitiven, konvexen, zwei- oder dreidimensionalen Objekten. Sie definieren Attribute zur Spezifikation von Lage, Größe und Erscheinung der Objekte und unterscheiden zwei Arten von Regeln: *Split*-Regeln, die Flächen oder Volumen im Sinne einer Tessellation zerlegen, und *Conversion*-Regeln, welche die Erscheinung eines Objekts innerhalb der gleichen räumlichen Ausdehnung ändern. Zusätzlich zur Split-Grammatik wird eine Kontrollgrammatik zur Attributpropagierung und zum Generieren von Erscheinungen definiert. Durch letzteres wird eine hohe Diversität der erzeugten Objekte erreicht. Zur Auswahl einer Produktionsregel wird die Übereinstimmung von Symbolattributen und Regelattributen bestimmt.

Das von Wonka et al. vorgestellte System besteht aus 250 Regeln und 40 Attributen, durch die Symmetrie, Komplexität und Stil bestimmt wird. Die Regeln wurden manuell nach den Vorbildern realer Gebäude aus unterschiedlichen Städten erstellt.

CGA shape Aufbauend auf seiner Arbeit zu Split-Grammatiken stellt Wonka zusammen mit anderen Autoren (Müller et al., 2006) *CGA shape*, eine Grammatik zum prozeduralen Erzeugen von Gebäudemodellen, vor. Neben der eigentlichen Grammatik setzten sie ebenfalls eine Kontrollgrammatik zur Steuerung der Ableitung ein. Die Produktionsregeln sind derart gestaltet, dass der Detaillierungsgrad des erzeugten Modells schrittweise erhöht wird. Es werden fünf Typen von Regeln unterschieden: (1) Scope Regeln: Rotation, Translation und Skalierung des für ein Objekt vorgegeben maximalen Raums (*Scope*), (2) basic split: Aufteilen des Scopes in mehrere Teile, (3) Skalierung von Objekten (nicht ihres Scopes!), (4) Wiederholungen von Objekten und (5) component split: Zerlegen eines Objekts in Bestandteile niedriger Dimension, z.B. das Zerlegen volumetrischer Objekte in Flächen, Kanten oder Punkte. Zur Vermeidung ungewollter Schnitte der Fassadenobjekte überprüfen

spezielle Regeln mögliche Überlappungen oder Schnitte der zu generierenden Objekte mit den bereits vorhandenen Objekten. Weiterhin werden s.g. *Snaplines* eingeführt, an denen Objekte über Stockwerke hinweg ausgerichtet werden. So wird beispielsweise sichergestellt, dass Fenster vertikal einheitlich platziert sind auch wenn sie von der Grammatik nicht geschossübergreifend, sondern horizontal innerhalb eines Geschosses erzeugt werden.



Abbildung 2.11: 3D-Modell des historischen Pompeji – generiert mit CGA shape (aus Müller et al., 2006)

Die Regeln von CGA shape werden in einer Notation spezifiziert, die der zuvor gezeigten Notation für L-Systeme ähnlich ist. Zur Modellierung des historischen Pompeji (s. Abbildung 2.11) wurden z.B. 190 Regeln definiert.

Müller et al. führen an, dass CGA shape nicht nur für die Modellierung von Gebäude, sondern auch für die Parzellierung einer virtuellen Geländeoberfläche und zum prozeduralen Erzeugen anderer baulicher Anlagen sowie Wegen und Vegetation geeignet ist. CGA shape wurde zur Grundlage für die kommerzielle Software *CityEngine* der Firma Procedural Inc. (2010). Mit *CityEngine* können synthetische Welten für z.B. Computerspiele oder Filme erzeugt werden.

Wand-Grammatik Larive und Gaildrat (2006) stellen einen grammatikbasierten Ansatz zur Modellierung von Gebäudefassaden vor (vgl. Abbildung 2.12(a)). Das vorgestellte Konzept basiert auf den oben dargestellten Split-Grammatiken und folgt dem erklärten Ziel „einfacher zu verstehen“ zu sein. Die Symbole der gezeigten Grammatik repräsentieren Wände. Es werden nur fünf Produktionsregeln benötigt: Eine terminierende Regel, zwei Regeln zur Positionierung der Objekte und zwei Regeln zur Modellierung sich wiederholender Strukturen. Durch die Repräsentation von Repetitionen wie horizontalen Reihen oder Matrizen von Fenstern ist ein Symmetrie-Konzept wie das der Snaplines nicht notwendig. Die Wand-Grammatik erzeugt lediglich die Anordnung von Fenstern und Balkonen auf der Fassade. Die Geometrie dieser Objekte wird durch Instanziierung von prototypischen 3D-Objekten oder durch Texturen realisiert.

Larive und Gaildrat zeigen ein 3D-Stadtmodell aus über 17000 Gebäuden, das durch Anwendung der Wand-Grammatik auf Kataster-Grundrissen erzeugt wurde. Sie stellen

ebenfalls einen Algorithmus zum Umgang mit nicht-planaren Grundrisspolygonen vor, der beim Erzeugen des 3D-Stadtmodells Anwendung fand. Die Dächer des Modells werden abhängig von der Skelettierung des Grundrisses aus diversen Dach-Prototypen gewählt.



Abbildung 2.12: Links: Wand-Grammatik für synthetische Gebäudefassaden (aus Larive und Gaildrat, 2006). Rechts: „Rekonstruktion“ des vom Baum verdeckten Bereichs des Gebäudes durch Nutzen von Style-Grammatik (aus Aliaga et al., 2007)

Style-Grammatik Auch Aliaga et al. (2007) stellen ein grammatikbasiertes Konzept zum synthetischen Generieren von 3D-Gebäudemodellen vor. Anders als die zuvor genannten Arbeiten, verwenden sie ein interaktives, datenbasiertes Verfahren zur Definition der Grammatiken. Ihr Ansatz beruht auf photogrammetrischer Mehrbildauswertung. Die Grammatik-Symbole werden manuell in mehreren orientierten Bildern durch Rechtecke definiert und haben wegen der bekannten Orientierung der Bilder dreidimensionale Entsprechungen. Auf diese Weise beschreibt ein Benutzer alle Bestandteile eines Gebäudes. Die Produktionsregeln werden im vorgestellten Verfahren durch Generalisierung gelernt. Aliaga et al. zeigen wie die so erhaltene Grammatik auf andere Grundrisse angewendet werden kann, um Gebäudemodelle zu generieren, die so ähnlich aussehen wie das Gebäude, aus dem die Grammatik abgeleitet wurde. Dazu verwenden sie die Texturen, die durch die manuelle Definition der Symbole spezifiziert wurden. Darüber hinaus präsentieren die Autoren wie eine visuelle Korrektur von Texturteilen, die Störobjekte wie z.B. Bäume enthalten, mit Hilfe der Grammatik erreicht werden kann (vgl. Abbildung 2.12(b)).

Attributierte Gebäudegrammatik Die Adaption von Attributgrammatiken zur Beschreibung von Geometrie und Semantik von Gebäudeteilen wird von Schmittwilken et al. (2007) am Beispiel von Treppen gezeigt. Das darauf aufbauende Konzept zur Repräsentation von Symmetrie und Topologie (Schmittwilken et al., 2009a) nutzt neben der Verwendung der semantischen Regeln zur Definition von Bedingungen auch das Potential kontextfreier Produktionsregeln zur Ableitung von Pallindromen, also spiegelsymmetrischen Worten, die vorwärts und rückwärts gelesen identisch sind.

Schließlich zeigen Krückhans und Schmittwilken (2009) die Verwendung attributierter Grammatiken zum synthetischen Generieren von Gebäudefassaden. Durch die Verwendung von Attributgrammatiken und die Repräsentation von Lage- und Formparametern in den Attributen der Symbole sowie die Zuweisung parametrisierter, geometrischer Primitive zu Terminalsymbolen ist es ihnen möglich, Ableitungsbäume geometrisch zu interpretieren. Aus Häufigkeitsverteilungen von Beobachtungen, wie beispielsweise der Anzahl von Stockwerken



Abbildung 2.13: Synthetisch generierter Straßenzug (aus Krückhans und Schmittwilken, 2009)

eines Gebäude oder der Anzahl von Fenstern eines Stockwerks, leiten sie Heuristiken ab, die sie in semantischen Regeln kodieren. So generieren sie durch randomisiertes Ableiten einer Grammatik einen Ableitungsbaum, der eine synthetische Gebäudefassade darstellt (vgl. Abbildung 2.13). Krückhans und Schmittwilken adressieren beispielsweise die automatische, lagetypische Verfeinerung von 3D-Stadtmodellen niedriger Auflösung. Dieser Ansatz wird in Abschnitt 5.3 aufgegriffen und weiter entwickelt.

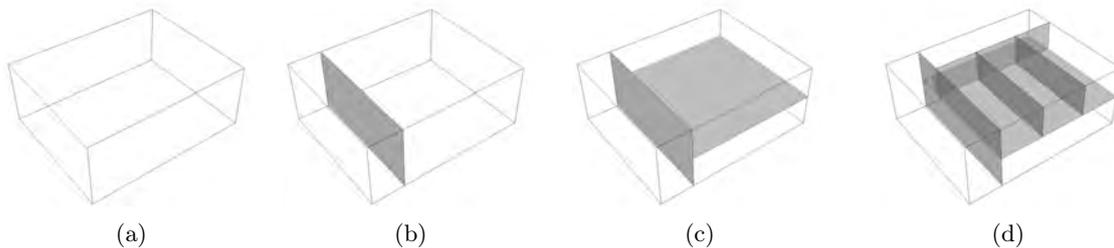


Abbildung 2.14: Innenraum-Grammatik: Topologisch korrektes Zerlegen eines Quaders zu einem Innenraummodell (aus Gröger und Plümer, 2010)

Innenraum-Grammatik Ein Konzept zur Innenraummodellierung stellen Gröger und Plümer (2010) vor. Sie präsentieren eine attributierte Grammatik zur topologisch korrekten Innenraummodellierung (vgl. Abbildung 2.14). Sowohl die topologische Korrektheit der Modelle als auch die Semantik der einzelnen Objekte sind die Voraussetzung für die von den Autoren adressierte Fluchtwegplanung. Anders als bei Split-Grammatiken, bei denen der jeweilige Kontext allein durch das zu teilende Objekt definiert ist, werden hier die topologischen Beziehungen aller bisher abgeleiteten Symbole durch einen globalen *constraint store* berücksichtigt. Dieser Constraintspeicher wird durch das Ausführen von semantischen Regeln gefüllt. Gröger und Plümer zeigen, dass so auch die topologischen Relationen von Symbolen

geprüft werden können, die sich in unterschiedlichen Teilbäumen des Ableitungsbaums befinden.

Zusammenfassung

Die vorgestellten Arbeiten zur Modellierung geometrischer Objekte sowie Gebäuden und Gebäudeteilen mit formalen Grammatiken und insbesondere synthetisch generierten Szenen zeigen, dass die Generizität und Ausdrucksstärke dieser Modelle ausreicht, um auch detaillierte Strukturen wie Fassaden zu modellieren.

2.3.2 Arbeiten zur Rekonstruktion von Gebäuden und Gebäudeteilen

Es werden in diesem Abschnitt Arbeiten zur Rekonstruktion von Gebäuden und Gebäudeteilen vorgestellt. Die Auswahl der Arbeiten beschränkt sich auf solche, die modellbasierte Ansätze verfolgen und so Vorwissen in den Rekonstruktionsprozess einbringen. Zunächst werden Arbeiten präsentiert, die unterschiedliche Modelle zur Formalisierung des Vorwissens verwenden. Anschließend werden schließlich grammatikbasierte Ansätze erläutert.

Allgemeine modellbasierte Ansätze

Im Gegensatz zu den Verfahren der geometrischen Rekonstruktion, welche eine 3D-Punktwolke ohne bzw. mit minimalem Modellwissen analysieren, werden in diesem Abschnitt Konzepte zur Rekonstruktion bestimmter Objekte vorgestellt. Dementsprechend fließt in die Verfahren vermehrt Wissen über die Lage und Form der jeweiligen Objekte ein. Allgemein werden solche Ansätze als *top-down* oder *modellbasierte* Verfahren bezeichnet. Sie unterscheiden sich somit von (den oben beschriebenen) *bottom-up* oder *uninformierten* Ansätzen.

Die nachfolgende vorgestellten Arbeiten zur Rekonstruktion von Gebäuden und Gebäudeteilen zeichnen sich durch vergleichsweise schwache und einfache Modelle zur Kodierung von Vorwissen aus. Im einfachsten Fall werden Schwellwerte für einzelne Modellparameter definiert.

Haala und Kada (2010) geben eine Übersicht über den Forschungsstand zur automatischen Erkennung von Gebäuden aus 3D-Punktwolken. Sie erläutern Verfahren zur Interpretation von Daten aus ALS und TLS. Für die Rekonstruktion von Fassaden sind lediglich die von den Autoren vorgestellten Arbeiten und Algorithmen relevant, die auf TLS-Daten basieren.

Reznik und Mayer (2008) zeigen ein Verfahren zur Rekonstruktion von Fenstern aus terrestrischen Bildern. Der auf MCMC (Markov-Chain Monte Carlo) Methoden beruhende Ansatz kann grundsätzlich auch auf 3D-Punktwolken übertragen werden.

Pu und Vosselman (2009, 2007, 2006) stellen ein Verfahren zur Rekonstruktion von Fassaden einschließlich ihrer Fenster vor. Zur Detektion der Fenster zeigen sie einen Algorithmus auf, der Regionen sehr geringer Punktdichte in der für eine Fassadenfläche geschätzten Ebene findet. Zur Detektion dieser „Löcher“ wird die Punktwolke trianguliert und lange Dreiecksseiten

gesucht, die in einer *Delaunay Triangulation* (Klein, 2005) eben auf eine geringe Punktdichte bzw. großen Punktabstand hinweisen. Schließlich werden die Fenster als Rechtecke in die Löcher geschätzt. Dieses Verfahren basiert auf der Tatsache, dass aufgrund der Transmission des Laserstrahls Glasflächen nicht angemessen werden können. Pu und Vosselman optimieren ihr Verfahren hinsichtlich seiner Robustheit durch das Einführen von Schwellwerten für die zu schätzenden Form- und Lageparameter. So wird die Rekonstruktion von Objekten, die deutlich größer oder kleiner sind als Fenster, also falsch positive Klassifikation, verhindert. Zugleich steigt bei der Verwendung fixer Schwellwerte aber auch die Wahrscheinlichkeit der falsch negativen Klassifikation, falls die Fenster tatsächlich sehr klein oder sehr groß sind.

Boulaassal et al. (2010) beschreiben ein recht ähnliches Verfahren. Zunächst bestimmen sie die Randpunkte von Öffnungen (Boulaassal et al., 2008), schätzen Geraden in diese Randpunkte und definieren schließlich Fenster über die Schnittpunkte der vertikalen und horizontalen Geraden. Im Gegensatz zu vielen anderen Arbeiten verstehen sie unter einem Fenster nicht nur die reine Öffnung, sondern auch die Umgebung der Öffnung. So schließt an die Detektion der Öffnungen eine semi-automatische Rekonstruktion der Dekoration des Fensters an.

Luo und Sohn (2010) zeigen einen Ansatz zur geometrisch-semantischen Interpretation von TLS-Daten. Sie definieren eine Heuristik in Form von Schwellwerten der geometrischen Eigenschaften von planaren Maschen und führen dann die Klassifikation dieser Maschen anhand eines Flussdiagramms, das sie als „Klassifikationsbaum“ bezeichnen, durch. Dieses Verfahren erinnert an einen Entscheidungsbaum (Mitchell, 1997), jedoch werden die Splitkriterien nicht entsprechend ihrer Entropiereduktion gelernt, sondern durch die freie Wahl und Reihenfolge von Schwellwerten festgelegt.

Tyleček und Šára (2011) stellen ein Verfahren zur Identifikation von Fenstern in terrestrischen Fassadenbildern vor. Ihr Ansatz beruht auf der Einbeziehung von Kontextinformation in die Mustererkennung. Dazu modellieren sie die Abhängigkeit der Parameter benachbarter Objekte explizit und stellen somit auch die Identität bestimmter Parameter sicher. Das Modell wird in ein rjMCMC Verfahren (reversible jump Markov-Chain Monte Carlo) integriert und zur Bedingung der Metropolis-Hastings-Schritte sowie der reversible jumps verwendet.

Grammatikbasierte Ansätze

Die modellbasierte Rekonstruktion von Gebäuden oder Gebäudeteilen setzt einen Formalismus zur Kodierung des Modellwissens voraus. In den zuvor beschriebenen Ansätzen ist dieses Wissen häufig in Heuristiken, Schwellwerten o.ä. beschrieben. Ein durchgängiger Formalismus zur Modellbeschreibung fehlt. Formale Grammatiken können zur Kodierung des Modellwissens verwendet werden. In diesem Abschnitt werden relevante Arbeiten vorgestellt, die Grammatiken zur Beschreibung der Modelle verwenden. In einigen der Ansätze werden die Grammatiken vom Benutzer vorgegeben, in anderen Arbeiten werden sie automatisch, teilweise zur Laufzeit des Verfahrens gelernt.

Steinhage (1999) verwendet eine Shape-Grammatik zur automatischen und modellbasierten Rekonstruktion von Gebäuden aus Luftbildern. Im Fokus stehen hier einfache Gebäudegrundrisse und -dachformen, die durch die Shape-Grammatik modelliert werden. Durch die

Integration von Grammatiken und Aspektbeschreibung wird das für Luftbildauswertung spezifische Domänenwissen beschrieben.

Dörschlag et al. (2008) stellen ein Konzept zur Modellierung von Gebäuden mittels Constraintgraphen und attributierten Grammatiken vor. Die Grammatik dient zur generischen Beschreibung von Modellhypothesen, die in einem Rekonstruktionsprozess sequenziell erzeugt und durch geeignete Kriterien bewertet werden können.

Müller et al. (2007) verwenden das von Ihnen und früheren Mitautoren vorgestellte Grammatik-Konzept *CGS-shape*, das sie bereits zum prozeduralen Herleiten von Straßennetzen und Gebäudegrundrissen (Parish und Müller, 2001) sowie Fassaden (Müller et al., 2006) verwendeten, zur semi-automatischen Rekonstruktion von Fassaden aus terrestrischen Einbildszenen. Sie unterteilen das Bild der Fassade durch Identifikation von Symmetrie in identische Elemente (Fensterkacheln), die in einem weiteren Schritt nochmals hierarchisch unterteilt werden. Abschließend werden diese Unterteilungen in Grammatikregeln überführt und zur interaktiven Verfeinerung des Modells verwendet.

Teboul et al. (2010) interpretieren segmentierte Bilder von Fassaden mithilfe eines Klassifikators, der durch Random Forests gelernt wurde und auf der Verknüpfung von Bildinformationen und einer formalen Grammatik beruht. Durch sogenannte Faktorisierung des Ableitungsbaums begrenzen sie den durch die Produktionsregeln aufgespannten Modellraum und stellen beispielsweise die Identität der Formparameter von Fenstern und deren symmetrische vertikale Ausrichtung innerhalb der Fassade sicher.

Vanegas et al. (2010) stellen eine Manhattan-World Grammatik vor, die sie zur Rekonstruktion eines Gebäudes aus luftgestützten Schrägaufnahmen einsetzen. Dazu vergleichen sie stockwerkweise von unten nach oben den Grundriss aus Geometriemodell und Bild und wenden die Grammatik zur Verbesserung des Geometriemodells an. Sie machen neben der grundsätzlichen Annahme der Orthogonalität aller Gebäudeteile vereinfachte Annahmen wie beispielsweise die Verjüngung des Gebäudes nach oben hin, also das Ausschließen auskragender Geschosse oder Erker oder das Ausschließen halber Stockwerke, also Fenstern, die um ein halbes Stockwerk versetzt sind (Treppenhaus).

Toshev et al. (2010) wählen Grammatiken zur Repräsentation geometrischer und topologischer Beziehungen zwischen planaren Maschen, die sie iterativ mit RANSAC und einer auf Schwellwerten beruhenden Zusammenhangsanalyse aus 3D-Punktwolken ableiten. Die Rekonstruktion erfolgt durch einen Parser, der den Ableitungsbaum wählt, der am besten zu den gegebenen Daten passt. Dazu wird der Raum möglicher Lösungen mit einer greedy Suche durchlaufen.

Schmittwilken et al. (2009b) präsentieren ein Verfahren zur Rekonstruktion von Gebäudeteilen, das auf der Kombination von Conditional Random Fields (CRF) (Kumar und Hebert, 2003) und attributierten Grammatiken basiert. Sie beschreiben die Kombination von schwachen (low-level) und starken (high-level) Klassifikationsverfahren und deren Interaktion und verbinden so die einfache geometrische Rekonstruktion planarer Teilflächen mit der semantischen Interpretation und Aggregation zu Objekten. Dabei werden die lokalen Nachbarschaften, die durch CRF repräsentiert werden, aufgegriffen und durch die Grammatik in aggregierte, semantisch reichhaltige Strukturen überführt.

Ripperda (2009, 2008) verwendet Grammatiken zur Beschreibung der Fassadenstruktur. Sie beschreibt die Anordnung von Fenstern und Türen in der Fassade durch Produktionsregeln. Die von ihr verwendeten Grammatiksymbole definieren neben Fenstern und Türen auch aggregierte Strukturen wie symmetrische Fassadenteile, Spalten oder Zeilen. Darüber hinaus stehen unterschiedliche Symbole für rasterartige Anordnung von Fenstern und Türen zur Verfügung. Der Rekonstruktionsprozess wird durch ein rjMCMC (reversible jump Markov-Chain MonteCarlo) Verfahren realisiert, deren Übergänge durch die Produktionsregeln der Grammatik einschließlich der aus empirisch ermittelten Daten gewonnenen Wahrscheinlichkeiten beschrieben werden. Die Autorin verwendet farb- und tiefenbasiertes Clustering sowie Autokorrelation zur Identifikation von Fenstern. Das Verfahren wird sowohl auf terrestrischen Bildern als auch auf aus LIDAR-Daten abgeleiteten Tiefenbildern angewendet. Das von Ripperda vorgestellte Verfahren wird am Beispiel großer Fassaden ohne Vorsprünge erläutert. Den gezeigten Grammatiken fehlen Produktionsregeln und Symbole, um weitere Fassadenelemente wie Vorsprünge, Erker oder Treppen darzustellen. Der Begriff Fassade wird von der Autorin mit der Anordnung von Fenstern und Türen in einer ebenen Fläche gleichgesetzt.

Becker (2010, 2009) kombiniert klassische Verfahren der Interpretation von Bildern und 3D-Punktwolken mit formalen Grammatiken. Zunächst identifiziert sie die Randpunkte von Fenstern als Löcher in 3D-Punktwolken und leitet aus dem Schnitt der sich daraus ergebenden Geraden eine Klassifikation in Wand- und Fensterzellen einschließlich deren Lage und Form her. Nach der Identifikation von Stockwerken analysiert sie in den Bereichen hoher Punktdichte mithilfe des SEQUITUR-Algorithmus (Nevill-Manning und Witten, 1997) die Abfolge der Wand- und Fensterzellen innerhalb eines Stockwerks und lernt so die Produktionsregeln der zugrunde liegenden Grammatik. Diese wird dann zur Generierung von Fensterhypothesen unbeobachteter oder unvollständig beobachteter Bereiche verwendet. Auch die von Becker vorgestellten Arbeiten werden ausschließlich auf ebenen Fassaden ohne Vorsprünge angewendet. Die vorgestellten Verfahren zur Identifikation von Fenstern, zur Aufteilung der Fassade in Geschosse und zur Hypothesengenerierung basieren auf der Annahme einer planaren Fassadenfläche. Die Autorin verwendet den Begriff Fassade synonym für die geschossweise Anordnung von Fenstern.

Zusammenfassung

In den diskutierten Arbeiten zur automatischen Rekonstruktion von Gebäuden wird die Fassade eines Gebäudes als planare Fläche betrachtet und mit der Lage und Form der enthaltenen Fenster gleichgesetzt. Auch werden zumeist homogene Fassaden großer Breite und Höhe betrachtet, die jeweils durch eine planare Fläche approximiert werden können und deren Fenster in regelmäßigen Rastern angeordnet sind.

Offen bleibt somit die Rekonstruktion heterogener Fassaden, die nicht durch planare Flächen approximiert werden können und in denen die Fenster nicht in regelmäßigen Rastern angeordnet sind. Ebenso fehlt es an Konzepten zur Rekonstruktion aggregierter Strukturen, die auch Treppen, Erker und andere Teilobjekte der Fassaden erfassen.

2.4 Zusammenfassung

Dieses Kapitel führte in die Thematik der Interpretation von 3D-Punktwolken und insbesondere in die Rekonstruktion von Fassaden ein.

Nach der Vorstellung der für diese Arbeit erfassten Daten in Abschnitt 2.1 wurden in Abschnitt 2.2 die relevanten theoretischen Grundlagen erarbeitet. Neben der probabilistischen Modellierung (vgl. Abschnitt 2.2.1) wurden die geometrische Modellierung sowie die Erfassung von 3D-Punktwolken (vgl. Abschnitt 2.2.3) erläutert. Anschließend wurden in Abschnitt 2.2.4 Konzepte zur Analyse von 3D-Punktwolken erläutert. Der Fokus wurde dabei auf den RANSAC-Algorithmus gelegt. Das ihm zugrunde liegende Paradigma des iterativen zufälligen Samplings und anschließender Modellinstanziierung sowie -bewertung wird vielfach als Grundlage robuster Schätzverfahren verwendet und auch in Kapitel 4 aufgegriffen, um einen entsprechenden Schätzer zu konzipieren. Auch das Konzept formaler Grammatiken wurde in Abschnitt 2.2.5 eingeführt.

Im abschließenden Literaturreview in Abschnitt 2.3 wurden Arbeiten diskutiert, die für diese Arbeit bezüglich der verwendeten Methode oder in Bezug auf das Ziel relevant sind. So wurden in Abschnitt 2.3.1 Arbeiten vorgestellt, die Grammatiken zur Modellierung geometrischer Objekte aber auch zur Modellierung von Gebäuden verwenden. In Abschnitt 2.3.2 wurden Arbeiten zur Rekonstruktion von Gebäuden diskutiert.

Zusammenfassen bleibt festzuhalten, dass die Verwendung formaler Grammatiken für die generische Modellierung von Gebäuden etabliert ist. Ebenso wurde bereits gezeigt, dass diese grammatikbasierten Modelle erfolgreich zur Rekonstruktion von Fassaden aus 3D-Punktwolken eingesetzt wurden.

Jedoch fehlen Ansätze zur Rekonstruktion heterogener Fassaden, deren Erscheinung nicht durch die rasterförmige Anordnung einer großen Anzahl von Fenstern geprägt ist. Ebenso wurde die Kombination attributierter Grammatiken und robuster Schätzer sowie deren Integration in eine Methode zum Schätzen komplexer Fassadenstrukturen bisher nicht näher betrachtet. Erste Ansätze hierzu wurden von Müller et al. (2007), Becker (2010), Ripperda (2009) und Tyleček und Šára (2011) aufgezeigt. Da 3D-Punktwolken jedoch nicht die Terminalsymbole der Grammatiken sind, ist es zu deren grammatikbasierten Interpretation notwendig, die Schnittstelle, sozusagen die „Übersetzung“, zwischen 3D-Punktwolke und Grammatiksymbol klar zu definieren und zu integrieren.

3 Formalisierung von Vorwissen

Das Einbringen von Vorwissen in die zur Rekonstruktion und Interpretation verwendeten Modelle setzt die Formalisierung des Vorwissens voraus. Da *das Vorwissen* über ein Objekt unterschiedliche Aspekte dieses Objekts betrifft, von denen sich einige quantifizieren, andere nur qualitativ beschreiben lassen, wird in diesem Kapitel sowohl die Erfassung des Vorwissens als auch die Formalisierung erläutert.

Das qualitative Vorwissen umfasst zumeist die Definition von Bestandteilen sowie deren Form und Erscheinung und deren gegenseitige Relationen. Die Größe und Proportion der Bestandteile lassen sich hingegen quantitativ beschreiben. Ein Mindestmaß an Vorwissen ist für die Rekonstruktion notwendig, die Integration weiteren Vorwissens trägt zur Robustheit der Verfahren bei. Beispielsweise ist das Vorwissen, dass Fenster zumeist rechteckige, mit Glas verkleidete Öffnungen in Wänden sind für deren Identifikation in 3D-Punktwolken notwendig. Das Wissen um die typische Breite und Höhe von Fenstern hilft sie von anderen Öffnungen zu unterscheiden.

In diesem Kapitel wird die Formalisierung der genannten Aspekte des Vorwissens thematisiert. Nach einer Übersicht über architektonische Gestaltungsprinzipien in Abschnitt 3.1 wird das qualitative Vorwissen beschrieben. Zunächst werden die für diese Arbeit relevanten Objekte definiert und ihre Relationen wie Aggregation und Generalisierung durch ein UML-Diagramm formalisiert (vgl. Abschnitt 3.2). Anschließend wird in Abschnitt 3.3 das in dieser Arbeit verwendete Geometriemodell von Fassaden erläutert. Schließlich wird die Quantifizierung von Vorwissen und eine entsprechende Repräsentation in Form von Wahrscheinlichkeitsdichten der Lage- und Formparameter präsentiert (vgl. Abschnitt 3.4). Darüber hinaus wird in Abschnitt 3.4.3 konkludiertes Vorwissen vorgestellt. Das Kapitel schließt in Abschnitt 3.5 mit einer Zusammenfassung.

3.1 Symmetrie und Proportion in der Architektur

Zur Erstellung des semantischen Modells von Fassaden und zur Beschreibung ihrer Struktur, scheint es sinnvoll, sich zunächst mit den zugrunde liegenden Entwurfskonzepten zu beschäftigen. Die für anthropogene Objekte typische Orthogonalität ist gerade im urbanen Raum allgegenwärtig. Dem Eindruck von Symmetrie kann sich der Betrachter von Architektur nicht erwehren. Strenge Regeln bezüglich der Proportion einzelner Objekte scheinen die Struktur von Fassaden zu dominieren.

Williams (1999) stellt in seiner Arbeit unterschiedliche in der Architektur relevante Arten von Symmetrien vor. Dabei betrachtet er sowohl Symmetrien im Zweidimensionalen, also Grund- und Aufrissen, als auch Symmetrien im Dreidimensionalen. Insbesondere unterscheidet er im letzteren Fall zwischen Symmetrien, denen die Bausubstanz (Mauern u.ä.)

gehört und solchen, denen der umbaute Raum, das Nichts, gehorcht. Für die Betrachtung von Fassaden sind nach Williams die Bilateralsymmetrie oder *Spiegelsymmetrie* und die *Translationssymmetrie* von großer Bedeutung.

Translationssymmetrie In ihrem allgemeinen Werk zur Symmetrie als „vereinendes Konzept“ sehen Hargittai und Hargittai (1994) die Translationssymmetrie als prominentes Beispiel für Symmetrie in Fassaden. Translationssymmetrie liegt auch den entsprechenden Arbeiten zur Detektion sich wiederholender Strukturen in Fassaden zugrunde (Musialski et al., 2010; Wenzel et al., 2008; Xiao et al., 2008; Pauly et al., 2008). Ebenso beschränken sich Autoren, die sich mit der Rekonstruktion von Fenstern als prägendes Element von Fassaden beschäftigen, auf die Annahme der Translationssymmetrie (Becker, 2009; Ripperda, 2008; Reznik und Mayer, 2008).

Orthogonalität und Parallelität Loch-Dehbi und Plümer (2011) zeigen die Dominanz von Orthogonalität und Parallelität bei der Konstruktion von Gebäuden. Sie untersuchten die gegenseitige Lage von jeweils zwei 3D-Flächen aus LOD-1-Modellen, die aus Katasterdaten abgeleitet wurden, innerhalb von Gebäuden, Straßenzügen und kleinmaßstäbigen Gebieten. Über 60% aller Paare von Flächen sind parallel oder orthogonal zueinander – dies schließt auch Paare von Flächen ein, deren einzelne Flächen in unterschiedlichen Gebäuden und sogar in unterschiedlichen Straßen liegen.

Proportion und Harmonie Auch die Lehre von Proportionen wie beispielsweise *Goldener Schnitt* (Frings, 2002) oder der von Le Corbusier (1948) beschriebene *Modulor* haben Einfluss auf den Entwurf und die Wahrnehmung von Gebäudegrundrissen und -ansichten. Neufert et al. (2002) geben einen Überblick über Proportions- und Harmonie-Konzepte in der Architektur und zeigt auf, dass gerade das Empfinden von Harmonie und Eleganz stark von Proportion und Gestalt beeinflusst wird. Die *Gestaltgesetze*, die ihren Ursprung in der Wahrnehmungspsychologie (Ehrenfels, 1890) haben, versuchen, die Ursache des Empfindens von Harmonie zu formalisieren. Insbesondere wird dies durch Gesetze der „Einheit und Harmonie“, „Ähnlichkeit“ und „Balances und Symmetrie“ (Chang et al., 2002) deutlich. Letztere werden auch in *Spiegelsymmetrie* und *Translationssymmetrie* ausgedrückt, wobei gerade auch die Variation der Größe von Teilobjekten eingeschlossen ist.

Die hier vorgestellten Symmetrie- und Harmoniekonzepte werden im Folgenden aufgegriffen und finden bei der Modellierung der räumlichen Beziehung einzelner Fassadenelemente Anwendung.

3.2 Das semantische Modell

Neben der geometrischen Repräsentation der Objekte ist auch die Beschreibung ihrer Semantik und gegenseitigen Relation von Bedeutung. Gerade im hier verfolgten modellbasierten Ansatz liegt dem Rekonstruktionsprozess formalisiertes Modellwissen zugrunde. Im Folgenden wird die Semantik von Fassaden und ihrer Bestandteile beschrieben.

Definition 3.1 (Gebäude). *Ein Gebäude ist ein auf der Erdoberfläche errichtetes Bauwerk, das durch ein Dach und zumeist senkrechte Wände begrenzt wird.*

Definition 3.2 (Wand). *Eine Wand ist ein massives Bauteil, dessen Oberfläche in erster Näherung durch eine planare Fläche approximiert werden kann. Eine Wand kann Löcher (Öffnungen) enthalten.*

Wegen der für Mitteleuropa häufigen Bauweise von Gebäuden wird der Begriff *Mauer* hier synonym für *Wand* verwendet.

Definition 3.1 basiert auf der oben beschriebenen B-Rep-Modellierung von Gebäuden und rechtfertigt gleichzeitig die synonyme Verwendung des Begriffs *Gebäude* für dessen äußere Hülle. Gerade die Tatsache, dass Innenräume nicht von außen beobachtet werden können, schließt die Modellierung des Gebäudeinnern ebenso aus. Die Betrachtung des unteren Abschlusses des Gebäudes bleibt ebenso außen vor.

Da Dächer wegen ihrer Neigung hier nicht als Teil der Fassade verstanden werden, und somit auch für deren Rekonstruktion keine wesentliche Rolle spielen, wird auf die weitere Definition und Modellierung von Dächern verzichtet.

3.2.1 Fassaden

In Architektur, Baukonstruktion sowie im umgangssprachlichen Verständnis unterscheidet sich die Semantik des Begriffs *Fassade* stark. Von vorgefertigten (Glas-)Bauteilen über prunkvolle Kirchen- oder Schloßportale bis hin zur gesamten Außenhülle eines Gebäudes reicht die Interpretation dieses Begriffs. Das folgende Zitat aus Herzog et al. (2004) vermittelt einen Eindruck der *architektonischen* Bedeutung von Fassaden.

Außenwände werden im allgemeinen Sprachgebrauch auch als „Fassaden“ bezeichnet, wodurch nun gegenüber den genannten Grundfunktionen von Witterungsschutz und Bestimmung des Raumklimas ein anderer Aspekt in den Vordergrund rückt: der der Wahrnehmung des Baus über sein „Gesicht“, abgeleitet auf dem Umweg über das französische „façade“ vom lateinischen „facies“. Gemeint ist also etwas Gebautes, das in seine Umgebung „hineinschaut“ bzw. von dort aus als erste und maßgebliche semantische Botschaft wahrgenommen wird.

Umso wichtiger scheint die Definition des Fassadenbegriffs und der relevanten Fassadenteile entsprechend ihrer Verwendung im Kontext dieser Arbeit zu sein. Neben den textlichen Definitionen einzelner Objekte, wird der in UML (Unified Modelling Language, Object Management Group, 2007) beschriebene Formalismus der *Klassendiagramme* verwendet, um die Beziehungen, nämlich Generalisierung, Spezialisierung, Aggregation und Assoziation der Objekte, zu beschreiben (vgl. Abbildung 3.1).

Die Klasse *Fassade* ist in orange hervorgehoben. Die blau hinterlegten Klassen und ihre Relationen sind in CityGML definiert. Bei den hellblauen Klassen wurden die Namen wegen der weiteren Verwendung in dieser Arbeit ins Deutsche übersetzt.

Definition 3.3 (Fassade). *Eine Fassade ist die Hauptansichtsseite eines Gebäudes. Meistens ist dies die dem öffentlichen Verkehrsraum zugerichtete Seite. Als Bestandteile gehören die Wände einschließlich deren Dekorationen sowie alle sonstigen baulichen Anlagen (z.B. Treppen oder Erker) zur Fassade.*

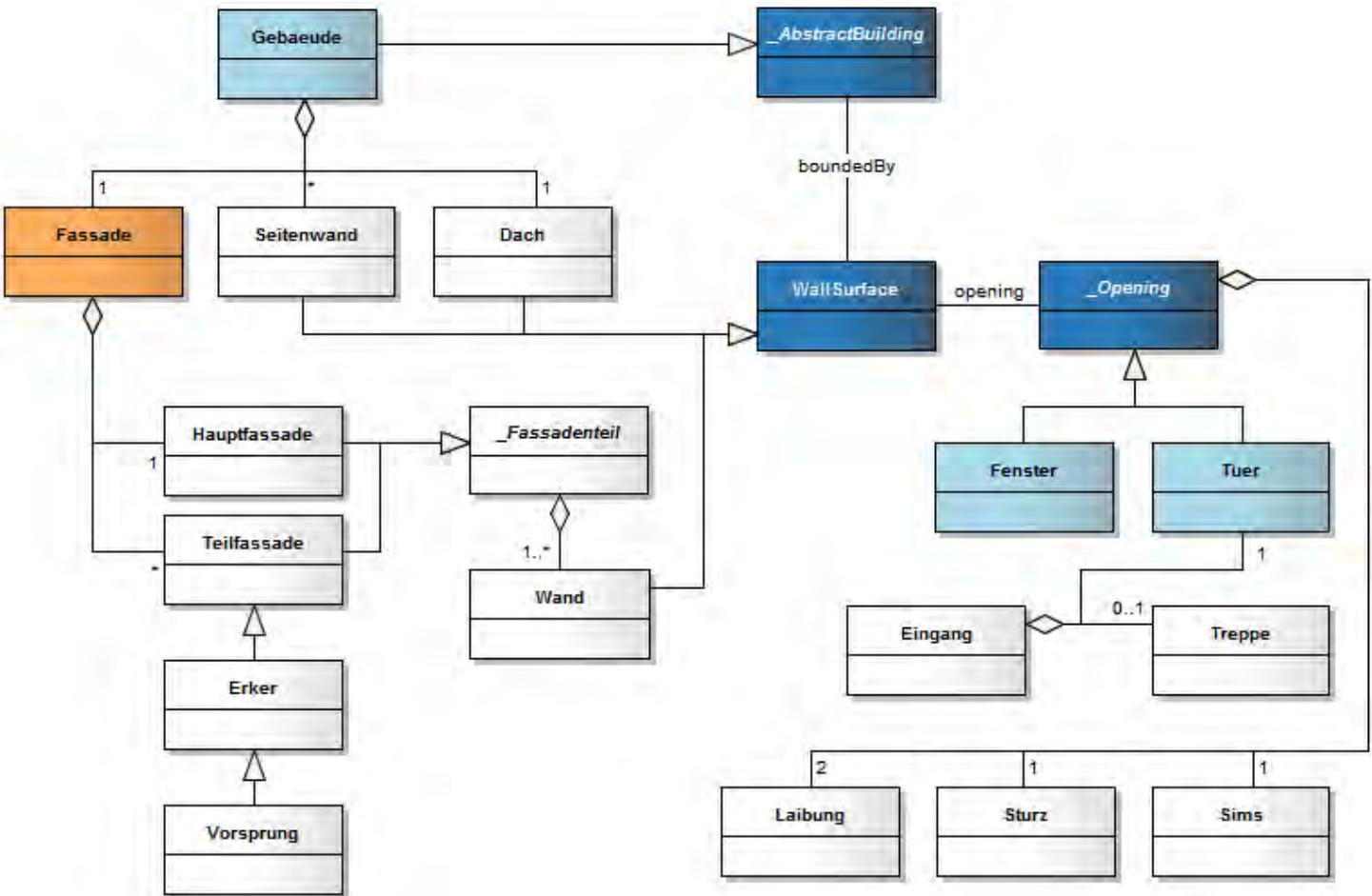


Abbildung 3.1: UML-Klassendiagramm zur Modellierung von Fassaden. Blaue hinterlegte Klassen sind in CityGML definiert

Definition 3.4 (Teilfassade). *Eine Teilfassade ist ein Teil einer Fassade, der eine räumlich zusammenhängende Teilmenge der Bestandteile einer Fassade umfasst. Dies schließt alle baulichen Anlagen wie Wände und Treppen ein.*

Definition 3.5 (Hauptfassade). *Die Hauptfassade ist die Teilfassade, welche die flächenmäßig größte Wand einer Fassade beinhaltet.*

Entsprechend wird auch im UML-Klassendiagramm in Abbildung 3.1 dargestellt, dass jede Fassade aus genau einer Haupt- und beliebig vielen Teilfassaden besteht.

Die Aggregation der Fassade ist in der abstrakten Klasse `_Fassadenteil` ausgedrückt. Der Unterstrich als Präfix des Klassennamens wird allgemein zur Kennzeichnung abstrakter Klassen verwendet, ebenso die kursive Schrift. Die Aggregation vererbt sich entsprechend an die Unterklassen `Hauptfassade`, `Teilfassade`, `Erker` und `Vorsprung`. Als Bestandteile der Fassade ist mindestens ein Objekt `Wand` und jeweils beliebig viele Objekte `Fenster` und `Eingang` definiert.

Abbildung 3.2 illustriert diese sowie die folgenden Definitionen.

Definition 3.6 (Erker). *Ein Erker ist eine spezielle Teilfassade, die vor der Hauptfassade liegt und eine zur Hauptfassade parallele Wand enthält. Ein Erker ist von innen begehbar, und die zur Hauptfassade parallele Wand hat eine Öffnung, meistens ein Fenster. Ein Erker kann ein teilweise auskragendes Geschoss oder mit der Erdoberfläche verbunden sein.*

Erker mit rundem Grundriss stellen eine Sonderform dar, bei der die zur Hauptfassade parallele Wand minimal ist. Jedoch ist das Fenster nicht „gebogen“ sondern zumeist dennoch parallel zur Hauptfassade.

Nach den Erfassungsvorschriften des Katasters in Nordrhein-Westfalen müssen Erker beispielsweise immer dann erfasst werden, wenn sie (a) die Gestalt des Gebäudes prägen und (b) der Aufwand für die Einmessung verhältnismäßig ist. Im Objektartenkatalog ALKIS (AdV, 2008) sind Erker nicht explizit genannt und werden in der Objektart `AX_Bauteil` durch das Attribut `bauart = 2500` (auskragende/zurückspringende Geschosse) definiert. Ein Vergleich des amtlichen Liegenschaftskataster-Informationssystems spiegelt diese offenen Bestimmungen wider: Die in Ortsvergleichen gefundenen Erker sind nur teilweise in ALKIS wiedergegeben.

Definition 3.7 (Vorsprung). *Ein Vorsprung ist ein Erker, der sich über die gesamte Gebäudehöhe erstreckt.*

CityGML Das oben aufgezeigte Modell von Fassaden ist der in CityGML (Gröger et al., 2008) verwendeten Modellierung ähnlich, jedoch wesentlich detaillierter. In CityGML sind Gebäude durch die abstrakte Klasse `_AbstractBuilding` sowie die nichtabstrakten Klassen `Building` und `BuildingPart` repräsentiert. `_AbstractBuilding` und `BuildingPart` sind ebenfalls rekursiv aggregiert – Ein `_AbstractBuilding` besteht aus `BuildingParts`, wobei ein `BuildingPart` eine Spezialisierung von `_AbstractBuilding` ist. `_AbstractBuilding` kann als Volumenkörper oder als `MultiSurface` (B-Rep) beschrieben werden, wobei die Oberflächen Öffnungen (`_Opening`) haben können, die entweder Tür (`Door`) oder Fenster (`Window`) sind.

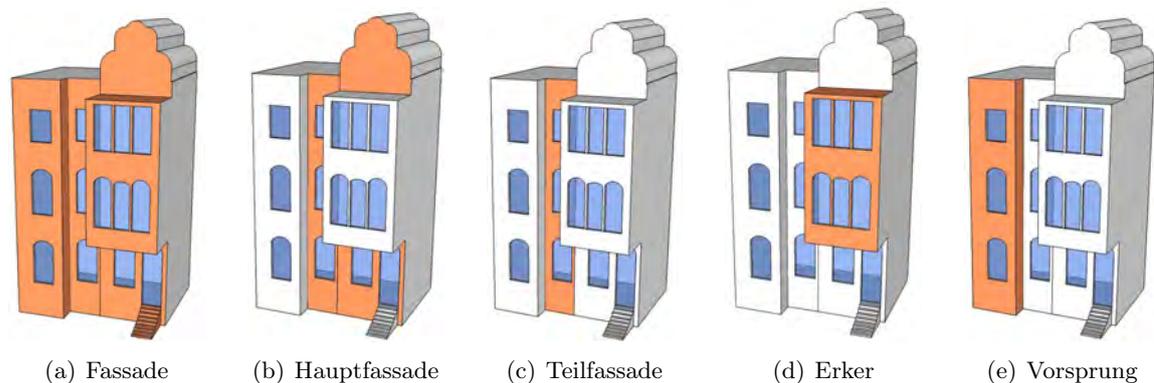


Abbildung 3.2: Beispielhafte Darstellung der Definitionen durch orange Einfärbung der entsprechenden Fassadenteile

Abgrenzung In den Definitionen von Wänden und Fassaden wurde eine für die Gestalt der Fassade wesentliche Annahme bereits gemacht: Im Rahmen dieser Arbeit basiert der Fassadenbegriff auf Wänden massiver Bauweise. Gerade in der modernen Architektur wird der Begriff *Fassade* jedoch fast ausschließlich für die zumeist gläserne Verkleidung von Bauwerken verwendet, die in sogenannte Skelettbauweise errichtet wurden. Dort ruht die Stützlast der oberen Geschosse auf einzelnen Stützelementen, sodass sich das Flächenverhältnis zwischen Wand und Öffnung quasi umkehrt (vgl. Knaak et al., 2010). Derartige Fassaden wie beispielsweise moderne Bürogebäude (z.B. Post Tower, Bonn oder Coloradoturm, Stuttgart) bleiben in dieser Arbeit unberücksichtigt.

3.2.2 Fenster

Das Erscheinungsbild einer Fassade wird im Wesentlichen durch Vorsprünge, Erker und Fenster, im größeren Maßstab auch durch Ornamente, geprägt. Dabei unterliegen diese Strukturen und deren Interaktion zunächst der gestalterischen Freiheit des Architekten. Allerdings sind dieser Freiheit durch Statik und Funktionalität bestimmte Grenzen gesetzt (Sullivan, 1896, „Form Follows Function“). Außerdem ist architektonische Gestaltung häufig durch die oben beschriebenen Konzepte von Symmetrie, Parallelität und Orthogonalität geprägt. Dies findet in den folgenden Definitionen Anwendung.

Definition 3.8 (Fenster). *Ein Fenster ist eine Öffnung in einer Wand, durch die Tageslicht in den Innenraum des Gebäudes gelangen soll. Ein Fenster ist links und rechts durch die Laibung, deren Tiefe meistens der Mauerstärke der Wand entspricht, begrenzt. Nach oben schließt das Fenster mit dem Sturz, nach unten mit der Sohle oder Fensterbank ab. Der Teil einer Wand, der unterhalb eines Fensters zwischen Fußbodenoberkante und Fensterbank liegt, wird als Brüstung bezeichnet.*

Umgangssprachlich wird unter dem Begriff Fenster häufig nur der *Fensterrahmen* aus Holz oder Kunststoff und/oder der bewegliche *Fensterflügel* verstanden. Nach obiger Definition umfasst ein Fenster hier aber eben auch Teile des angrenzenden Mauerwerks.

3.2.3 Treppen

Der wesentliche Grund, der Menschen zum Erbauen von Gebäuden veranlasste, ist der Schutz vor Witterung und Feinden (Herzog et al., 2004). Der Schutz vor Witterung insbesondere Regen ist auch der Grund dafür, dass die Oberkante des Fußbodens des Erdgeschosses über dem Niveau des ans Gebäude anschließenden Geländes liegt. So kann kein Wasser in das Gebäude hinein laufen. Aber auch das Vorhandensein eines Souterrain, also eines halben Kellergeschosses, kann einen Niveauunterschied zwischen Gelände und Erdgeschossfußboden bedingen. Zur Überwindung solcher Höhendifferenzen werden Treppen gebaut, die ob ihrer Lage vor einem Gebäude eben auch Bestandteil der Fassade sind.

Außerdem erfüllen Treppen die semantisch sehr bedeutende Aufgabe, das umliegende Gelände mit der Tür bzw. dem Eingang und somit mit dem Inneren des Gebäudes zu verbinden. Die explizite Repräsentation dieses Wissens ist beispielsweise für die automatische Fluchtwegsplanung in 3D-Modellen wichtig (Becker et al., 2008).

Definition 3.9 (Treppenlauf). *Ein Treppenlauf ist eine bauliche Anlage zur Überwindung eines Höhenunterschieds. Sie besteht aus der Abfolge von Stufen, die aus horizontalen Elementen, den Auftritten bestehen. Der Höhenunterschied zwischen zwei aufeinander folgenden Auftritten wird als Steigung bezeichnet. Die vertikale Fläche zwischen der Hinterkante eines Auftritts und der Vorderkante des darüber liegenden Auftritts wird ebenfalls als Steigung bezeichnet.*

Definition 3.10 (Treppe). *Eine Treppe ist die Kombination mehrerer Treppenläufe. Zwischen den Treppenläufen einer Treppe befinden sich horizontale Plattformen, die als Podeste bezeichnet werden. Eine Treppe kann auch aus nur einem Treppenlauf bestehen.*

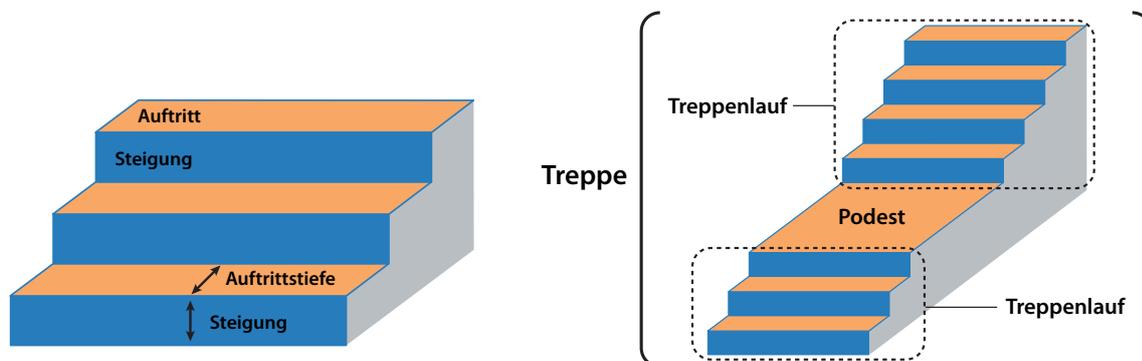


Abbildung 3.3: Bestandteile einer Treppe

Die Definitionen orientieren sich an den entsprechenden Normen DIN und ISO (Deutsches Institut für Normung e.V., 2000; International Organization for Standardization, 1977).

Sind die Steigungen der einzelnen Treppenstufen parallel zueinander, so ergeben sich rechteckige Grundrisse für die Auftritte und der Treppenlauf ist *gerade*. Als *gewendelte* Treppe (Baus und Habermann, 2006) werden solche Treppen bezeichnet, bei denen die einzelnen

Steigungen horizontal gegeneinander verdreht sind. Eine umfangreiche Übersicht über die Ausgestaltung und Konstruktionsprinzipien von Treppen bietet Mielke (1993).

Bereits 1683 beschäftigte sich Blondel ausführlich mit der Geometrie von Treppen. Er dokumentierte eine Beziehung zwischen menschlicher Schrittlänge l und der Abmessung von Auftrittstiefe a und Steigung s , die sowohl ein sicheres als auch ein bequemes Begehen von Treppen sicher stellt. Die als *Schrittmaßregel* bezeichnete Formel

$$2s + a = l$$

hat bis heute Gültigkeit und findet in der DIN 18 065 (Deutsches Institut für Normung e.V., 2000) Anwendung. Blondel verwendete die damals übliche Schrittlänge von 65 cm; die DIN hingegen gibt einen Bereich von 59 cm bis 65 cm vor. Die Berechnung der Schrittlänge nach der Schrittmaßregel aus den empirisch erfassten Daten für Treppen bestätigt dies. Die errechneten Schrittlängen können als normalverteilt mit dem Mittelwert 64,9 cm und einer Standardabweichung von 3,2 cm angenommen werden (vgl. Abbildung 3.4).

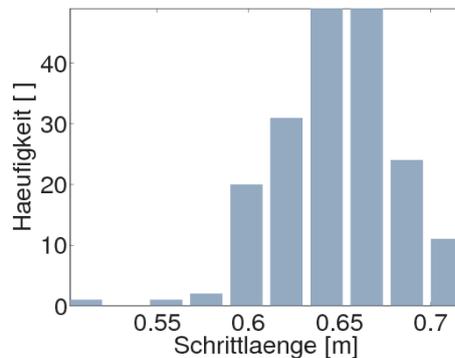


Abbildung 3.4: Häufigkeitsverteilung der nach der Schrittmaßregel berechneten Schrittlänge

Die in Abschnitt 4.1 thematisierte Rekonstruktion von Treppen aus 3D-Punktwolken adaptiert diese Regel und macht sich die dadurch implizierte und sicherheitsrelevanten Eigenschaft von Treppen zunutze: Die Konstanz von Auftrittstiefe a und Steigung s innerhalb einer Treppe (Pech und Kolbitsch, 2005).

3.3 Das Geometriemodell

Auch in dieser Arbeit werden Objekte durch B-Rep-Modelle beschreiben. Die Modellierung von Volumenkörpern wird nicht gefordert. Durch die Tessellation, entsteht zudem ein topologisch korrektes Modell (Gröger und Plümer, 2005; Gröger und Plümer, 2010), dessen weitere Verarbeitung in einem CAD- oder GIS-System möglich ist. Ebenso lassen sich diese Modelle in standardisierte Formate wie CityGML überführen.

3.4 Quantifizierbares Vorwissen

Im Folgenden wird das quantifizierbare Vorwissen betrachtet und dessen Repräsentation für die weitere Verwendung in dieser vorgestellt. Es werden die in Abschnitt 2.1 (S. 9) beschriebenen Daten verwendet.

3.4.1 Quantifiziertes Vorwissen

Quantifizierbares Vorwissen entspricht hier Modellparametern, deren *Häufigkeitsverteilung* aus Messdaten erfasst wird. Die Ermittlung der Häufigkeitsverteilungen erfolgt für ganzzahlige Modellparameter wie die Anzahl der Geschosse eines Gebäudes durch *Abzählen* oder für reelle Modellparameter wie die Breite von Fenstern durch *Messen*. Die Häufigkeitsverteilungen wurden aus den in Abschnitt 2.1 beschriebenen Daten erfasst. Dazu wurde das Programm *MeasureFacade* derart erweitert, dass Strecken in Bilder und 3D-Punktwolken gemessen und in einer Datenbank gespeichert werden können.

Tabelle 3.1 gibt eine Übersicht über die erfassten Modellparameter. Die Datenerfassung wurden mit *MeasureFacade* auf Grundlage von Bildern und 3D-Punktwolken durchgeführt. Die abzählbaren Parameter wurden aus Bildern erfasst. Die Erfassung der Daten von Treppen wurde vor Ort durchgeführt.

Abbildung 3.5 zeigt in der oberen Zeile die Häufigkeitsverteilung einiger Modellparameter von Fenstern in Form von Histogrammen. Um den unterschiedlichen Wertebereichen der Parameter Rechnung zu tragen, wurde eine feste Anzahl von 50 Klassen gewählt. Es ergibt sich demnach eine Intervallbreite von 7 cm (Fensterbreite) und 37 cm (z -Koordinate) pro Klasse.

Die Breite von Fenstern variiert zwischen weniger als einem Meter bis hin zu über drei Meter breiten Fenstern. Jedoch sind gerade die Fenster, deren Breite ungefähr einem Meter entspricht, deutlich häufiger erfasst worden. Ein zweites Cluster bilden die Fenster mit einer Breite von etwas über zwei Metern. Ähnlich scheint auch die Höhe der Fenster in den Bereichen von ca. einem Meter und gut zwei Metern am deutlichsten ausgeprägt zu sein, jedoch streuen diese beiden Cluster deutlich stärker, als die der Fensterbreite. Die Häufigkeitsverteilung der z -Position, also der z -Koordinate des Referenzpunktes, zeigt deutlich drei Cluster, die durch die relativ einheitliche Stockwerkshöhe der untersuchten Gebäude bedingt sind. Die Cluster beinhalten entsprechend die Fenster der Erdgeschosse und der ersten und zweiten Obergeschosse.

Anhang A zeigt die Häufigkeitsverteilungen aller Modellparameter

Diese Häufigkeitsverteilungen entsprechen nicht den von Ripperda (2009) gezeigten Verteilungen. Dies veranschaulicht den Unterschied der betrachteten Gebäudetypen deutlich: Bei Ripperda stehen eher großflächige homogene Fassaden im Fokus. Darauf deuten die Histogramme „Anzahl an Fenstern pro Fassade“ (im Mittel ca. 20 Fenster pro Fassade) und „Anzahl Zeilen und Spalten in einer Fassade“ (durchschnittlich ca. 4 Zeilen und 4 bis 5 Spalten) hin. In dieser Arbeit hingegen werden stark strukturierte Fassaden des Jugendstils mit durchschnittlich 7 Fenstern sowie 3 Zeilen und Spalten betrachtet.

Die Abhängigkeit der Verteilungen von der jeweils betrachteten Domäne wird offensichtlich. Die Übertragbarkeit des quantifizierten Vorwissens auf andere Gebäudetypen bedarf daher der weiteren Prüfung.

Objekt	Parameter	Erfassung	Einheit	Beschreibung
Balkon	balcony	zählen	[]	Vorhandensein eines Balkons (0,1)
Erker	nfloors	zählen	[]	Höhe des Erkers in Stockwerken
	position	zählen	[]	Lage des Erkers (links, mittig, rechts)
	width	messen (2D)	[cm]	Breite des Erkers
	depth	messen (3D)	[cm]	Tiefe des Erkers
	height	messen (2D)	[cm]	Höhe des Erkers
	footprint	zählen	[]	Grundrisstyp (Rechteck, Trapez, rund)
Gebäude	entrancePosition	zählen	[]	Lage des Eingangs (links, mittig, rechts)
	doorDistFromSide	messen (2D)	[cm]	Abstand Tür von nächster Gebäudeseite
	nFloors	zählen	[]	Anzahl der Geschosse
	width	messen (2D)	[cm]	Breite des Gebäudes
	heightGroundFloor	messen (2D)	[cm]	Höhe des EG
	heightFirstFloor	messen (2D)	[cm]	Höhe des OG1
	nWindows	zählen	[]	Anzahl der Fenster (aller Typen)
	nArchWindows	zählen	[]	Vorhanden von Fenstern mit Bogen
	nWindowTypes	zählen	[]	Anzahl unterschiedlicher Fenstertypen
	Tür	x	messen (3D)	[cm]
y		messen (3D)	[cm]	y-Koordinaten des Referenzpunktes
z		messen (3D)	[cm]	z-Koordinaten des Referenzpunktes
width		messen (2D)	[cm]	Breite der Tür
depth		messen (3D)	[cm]	Tiefe der Tür
height		messen (2D)	[cm]	Höhe der Tür
Treppe	treadDepth	messen	[cm]	Tiefe des Auftritts
	rise	messen	[cm]	Höhe der Stufe
	width	messen	[cm]	Breite der Treppe
	nSteps	zählen	[]	Anzahl der Stufen
Fenster	x	messen (3D)	[cm]	x-Koordinaten des Referenzpunktes
	y	messen (3D)	[cm]	y-Koordinaten des Referenzpunktes
	z	messen 3D)	[cm]	z-Koordinaten des Referenzpunktes
	width	messen (2D)	[cm]	Breite des Fensters
	depth	messen (3D)	[cm]	Tiefe des Fensters
	height	messen (2D)	[cm]	Höhe des Fensters
	position	zählen	[]	Position in Fensterraster

Tabelle 3.1: Erfasste Modellparameter von Fassaden

3.4.2 Repräsentation quantifizierten Vorwissens

Zur weiteren Verwendung eignet sich die Repräsentation des quantifizierten Vorwissens durch Häufigkeitsverteilungen nicht, da so lediglich eine beliebige Diskretisierung des kontinuierlichen Wertebereichs dargestellt wird. Vielmehr sind Wahrscheinlichkeitsdichten von Interesse, die mit geeigneten Schätzverfahren wie der *Maximum Likelihood Schätzung* (MLE, Maximum Likelihood Estimation, Russel und Norvig, 2003) für parametrische Dichten oder *Kerndichteschätzern* für nichtparametrische Dichten bestimmt werden können.

Da die Repräsentation der Dichte durch parametrische uni- oder multivariate Verteilungen wie Beta-Verteilung (Dehbi und Plümer, 2010), Weibullverteilung (Schmittwilken und Plümer, 2010) oder Mischverteilungen die korrekte Wahl der zu schätzenden Verteilung voraussetzt, werden die Dichten hier durch nichtparametrische *Kerndichteschätzer* geschätzt. Ganzzahlige Modellparameter wie die Anzahl der Stufen einer Treppe oder die Anzahl der Fenster oder die

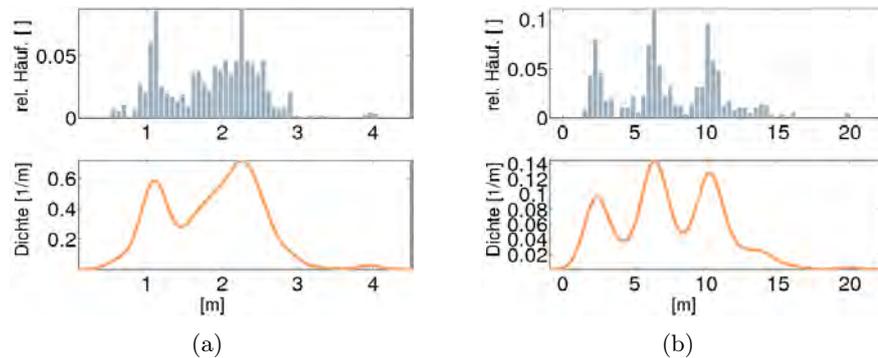


Abbildung 3.5: Verteilungen als Histogramm (blau) und Dichte (orange): Höhe von Fenstern (a) und z -Koordinate des Referenzpunktes (b)

Lage des Eingangs (links, mittig, rechts) werden weiterhin durch ihre Häufigkeitsverteilung repräsentiert.

Abbildung 3.5 zeigt in der unteren Reihe die geschätzten Dichten. In Anhang A werden auch die geschätzten Dichten der übrigen Modellparameter aufgezeigt. Diese Wahrscheinlichkeitsdichten kodieren das *a priori* Vorwissen der Lage- und Formparameter der Fassadenobjekte und werden in die in den folgenden Kapiteln vorgestellten Methoden integriert, um die Robustheit der Rekonstruktion zu steigern.

3.4.3 Konkludiertes Vorwissen

Aufbauend auf dem Begriff des Fensters (vgl. Abschnitt 3.2.2) werden im Folgenden aggregierte Fenster-Strukturen betrachtet. Da Fenster der Beleuchtung von Innenräumen und deren Versorgung mit Frischluft dienen, sind gerade in mehrgeschossigen Gebäuden mehrere Fenster zu finden. Basierend auf den in Abschnitt 3.1 (S. 43) vorgestellten Symmetriekonzepten wird nun die Anordnung mehrerer Fenster in einer Fassade thematisiert. Hierzu werden Ergebnisse des im vorherigen Abschnitt vorgestellten empirisch ermittelten Vorwissens verwendet.

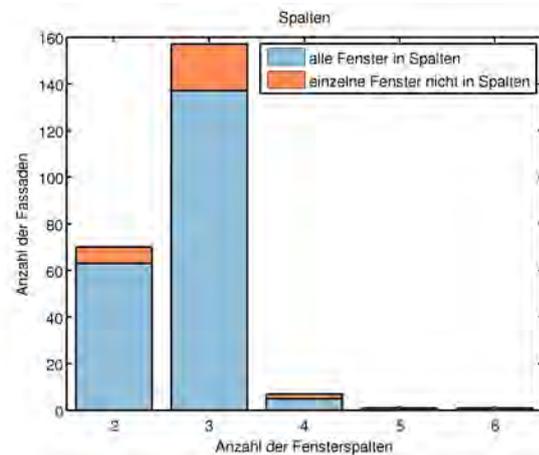
Spalten Um die statischen Eigenschaften der Wand als tragendes Bauteil nicht zu gefährden, kann eine Wand nicht beliebig viele Fenster beinhalten. Weiterhin sind aufgrund der Statik die inneren Wände des Gebäudes typischerweise geschossweise unter- bzw. übereinander angeordnet, um die entstehenden Vertikallasten abzufangen, s.g. tragende Wände (vgl. Reyer, Eckhard und Willems, 1997). Daraus resultiert der identische Grundriss der über- und untereinander liegenden Räume. Dies bedingt wiederum die symmetrische Lage der Fenster. Es ergibt sich folglich die Anordnung der Fenster lotrecht untereinander wie beispielsweise in Abbildung 3.6(a) zu sehen. Diese vertikal-symmetrische Ausrichtung entspricht auch den oben beschriebenen Symmetrie- und Harmoniekonzepten der architektonischen Gestaltung, die im Wesentlichen auf Spiegel- und Translationssymmetrie beruhen.

Auch eine stichprobenhafte Untersuchung realer Gebäudefassaden belegt diese Überlegung. Abbildung 3.6(b) zeigt die Analyse von 236 Fassaden mit 1936 Fenstern im Stadtgebiet

von Bonn (zur Datenerfassung s. Abschnitt 2.1.2, S. 12). Die untersuchten Gebäude weisen zwischen zwei und sechs Fensterspalten auf. Die orangenen Anteile der einzelnen Säulen stellen die 29 Fassaden dar, die durchschnittlich 1,3 Fenster beinhalten, die sich keiner Spalte zuordnen lassen.



(a)



(b)

Abbildung 3.6: Fassade mit vertikal angeordneten Fenstern (links) und Analyse der Anordnung von Fenstern in Spalten (rechts)

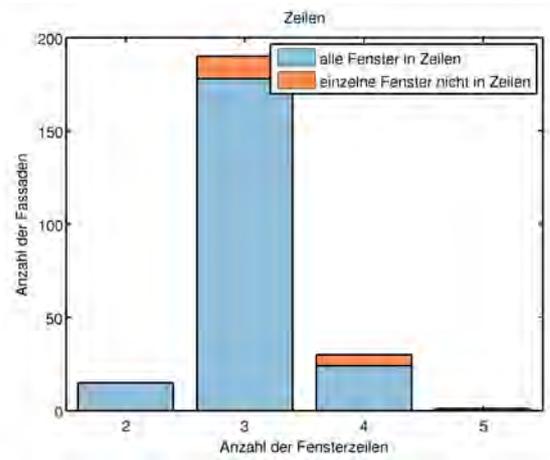
Zeilen Neben der vertikalen Ausrichtung der Fenster ist auch die horizontale, zeilenförmige Gruppierung von Fenstern zu untersuchen. Innerhalb eines Geschosses ändert sich die Höhe der Fußbodenoberkante für gewöhnlich nicht. Auch gibt es baurechtliche Vorschriften, die aus Sicherheitsaspekten eine Mindesthöhe der Fensterbrüstung von ca. 80 cm und somit die vertikale Lage der Fenster weitestgehend vorgeben. Nach Fischer et al. (2002) ist die Größe eines Fensters nach der Tiefe des Raums und dem Abstand und der Höhe des gegenüberliegenden Gebäudes zu bemessen. Dabei ist die Höhe des Fensters von weitaus größerer Bedeutung als dessen Breite. Zusammen mit den bereits angestellten Überlegungen zur Symmetrie liegt also eine Anordnung der Fenster entlang einer horizontalen Achse nahe (vgl. Abbildung 3.7(a)). Die Analyse der Fassaden der 236 Gebäude in Abbildung 3.7(b) zeigt in orange die 18 Gebäude, deren Fassaden einzelne Fenster enthalten, die nicht einer horizontalen, zeilenweisen Struktur entsprechen.

Raster In den zuvor angestellten Überlegungen ist eine rasterförmige Repräsentation der Fenster einer Wand begründet. Aus zeilen- und spaltenweiser Anordnung folgt diese konsequent. Dabei ist ein solches Raster nicht zwangsläufig regelmäßig: Horizontale und vertikale Abstände der Spalten und Zeilen können dabei variieren.

Treppenhäuser Gerade die Fenster von Treppenhäusern weichen häufig von der horizontalen Flucht ab, da eben Treppenhäuser der Annahme widersprechen, dass innerhalb eines Geschosses keine Niveauunterschiede auftreten. Genau das ist ja eben Zweck von Treppenhäusern. Somit sind die Fenster in Treppenhäusern häufig um ein halbes Stockwerk gegenüber



(a)

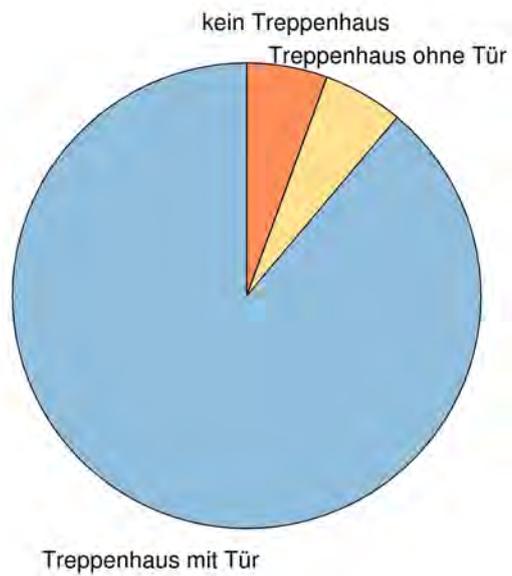


(b)

Abbildung 3.7: Fassade mit horizontal angeordneten Fenstern (links) sowie Analyse der Anordnung von Fenstern in Zeilen (rechts)



(a)



(b)

Abbildung 3.8: Treppenhausfenster sind gegenüber übrigen Fenstern des Stockwerks vertikal versetzt (links). Häufigkeitsverteilung der Gründe für Fenster ohne Zeilenzugehörigkeit (rechts)

den übrigen, zeilenweise angeordneten Fenster versetzt. Eine solche „Treppenhausspalte“ (vgl. Abbildung 3.6(a) und 3.8(a)) war in 17 der 236 untersuchten Gebäudefassaden zu finden und konnte 17 der 18 Fassaden mit Fenstern ohne Zeilenzugehörigkeit erklären. In 16 der 17 Fassaden ist die Eingangstür das unterste Element dieser Spalte. In nur einer Fassade wurden Fenster gefunden, die keiner Zeile und keiner Treppenhausspalte zugeordnet werden konnten.

Strukturlinien Aufgrund ihrer Größe haben Erker starken Einfluss auf die Erscheinung der gesamten Fassade – sie prägen das „Gesicht“ des Gebäudes. Für die Anordnung der Fenster in der Fassade haben Erker strukturgebende Bedeutung: Durch den Schnitt der Hauptfassade und der zu dieser nicht parallelen Wände des Erkers ergeben sich Liniensegmente, die hier, bis zum Rand der Fassade fortgesetzt, als *Strukturlinien* bezeichnet werden (vgl. Abbildung 3.9). Diese Unterteilung der Fassade wird im Folgenden zur Bestimmung von Fassadenteilen verwendet. Darüber hinaus schneiden diese Strukturlinien Fenster in nur ca. 7% der Fassaden: 22 der 148 Fassaden mit Erkern – darunter 12 vertikale und 10 horizontale Strukturlinien sowie in einem Fall beide. Die Schnitte mit waagerechten Strukturlinien sind alle auf Treppenhausspalten zurückzuführen (vgl. Abbildung 3.8(a)).

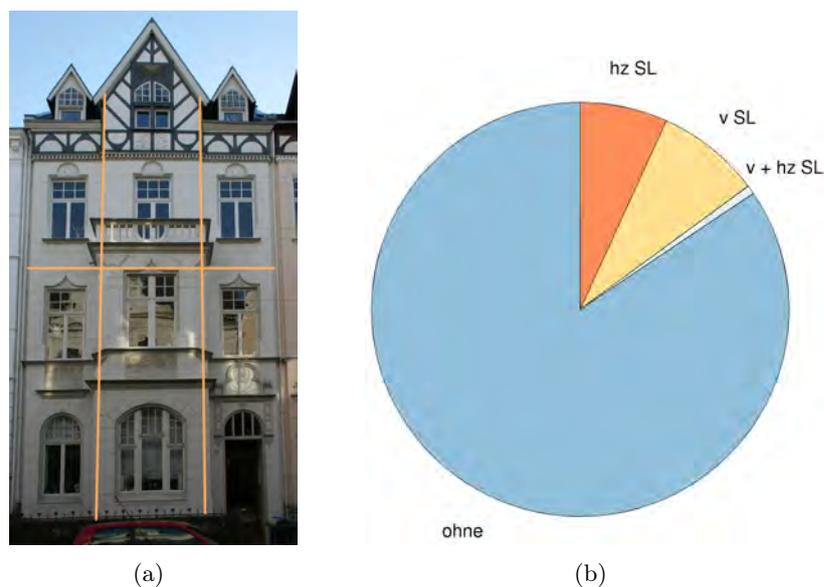


Abbildung 3.9: Die Schnitte der Erkerwände mit der Hauptfassade definieren *Strukturlinien*, die zumeist frei von Fenstern sind (links). Häufigkeitsverteilung der Schnitte von horizontalen (hz) und vertikalen (v) Strukturlinien (SL) und Fenstern (rechts)

3.5 Zusammenfassung

Als Beitrag zur automatischen Erstellung von 3D-Stadtmodellen wird in dieser Arbeit ein Konzept zur modellbasierten Rekonstruktion von Fassaden aus 3D-Punktwolken vorgestellt.

Im vorangegangenen Kapitel wurde das dazu verwendete Modell- und Vorwissen sowie dessen Erfassung und Repräsentation beschrieben.

Neben der Modellierung der Wahrscheinlichkeitsdichte von Lage- und Formparametern in Abschnitt 3.4 ist auch die Modellierung der Semantik der Objekte sowie deren Relationen ein wichtiger Teil des hier vorgestellten modellbasierten Ansatzes. Nach der Erläuterung abstrakter architektonischer Gestaltungsprinzipien wie Symmetrie und Proportion in Abschnitt 3.1 wurden daher sowohl das geometrische (vgl. Abschnitt 3.3) als auch das semantische Modell (vgl. Abschnitt 3.2) für Fassaden spezifiziert. Mithilfe eines UML-Diagramms und Begriffsdefinitionen wurden die wichtigen Teilobjekte von Fassaden wie Erker, Vorsprünge und Fenster beschrieben. Abschließend wurde die Bedeutung von Treppen als wichtiger Bestandteil von Fassaden herausgestellt und diese ebenfalls modelliert. Insbesondere wurde die Repräsentation der Regelmäßigkeit von Treppen diskutiert.

Die Repräsentation der in Abschnitt 2.1 (S. 9) vorgestellten Daten durch Häufigkeitsverteilungen in Form von Histogrammen ist nicht ausreichend, da die eigentlich kontinuierlichen Wertebereiche so nur diskretisiert werden. Durch Kerndichteschätzer wird die entsprechende Dichte geschätzt, so dass auch die probabilistische Modellierung der Fassadenobjekte bezüglich ihrer Form und Lageparameter möglich ist.

Weiterhin wurden Modelle für die vertikale und horizontale Anordnung von Fenstern und Türen vorgestellt und empirisch belegt sowie das Konzept der *Strukturlinien* eingeführt, das die strukturgebende Funktion von Erkern mit der Annahme von Symmetrie und Proportion vereint.

Mit dem vorangegangenen Kapitel wird mit dem dort beschriebenen *Modell* im Wortsinn die *Basis* für die im Folgenden erläuterte *modellbasierte* Rekonstruktion gelegt. Die wesentliche Herausforderung besteht nun darin, das Modellwissen in den Rekonstruktionsprozess zu integrieren und so zur Robustheit des Verfahrens beizutragen. Es geht also darum, die offensichtliche Kluft zwischen den in architektonischen Lehrbüchern beschriebenen Konzepten wie Harmonie, Symmetrie und Proportion sowie abstrakten, semantischen Modellen einerseits und der Repräsentation der Wirklichkeit durch verrauschte und unvollständige 3D-Punktwolken andererseits zu schließen.

Das folgende Kapitel behandelt zunächst die Rekonstruktion einzelner Fassadenteile durch den robusten Schätzer MOSAP und zeigt auf, wie die in diesem Kapitel vorgestellten Wahrscheinlichkeitsdichten hierfür genutzt werden können. In Kapitel 5 wird dann die Integration des in Abschnitt 3.2 beschriebenen Modells und des in Abschnitt 3.4 beschriebenen Vorwissens in attributierte Grammatiken vorgestellt. Schließlich wird in Kapitel 6 die Kombination des robusten Schätzers und der Attributgrammatik gezeigt.

4 Rekonstruktion einzelner Fassadenteile

Die in Kapitel 3 vorgestellten Modelle, die Vorwissen über Objekte, deren Relation aber auch über ihre Lage- und Formparameter beinhalten, werden in diesem Kapitel aufgegriffen und in den Rekonstruktionsprozess einzelner Fassadenobjekte integriert. Die intensive Verwendung von Vorwissen steigert einerseits die Robustheit des Verfahrens und hilft andererseits bei der Interpretation, also der Ableitung der Semantik, der entsprechenden Objekte.

Im Folgenden wird die Rekonstruktion von Objekten vorgestellt, die durch eine geringe Anzahl von Parametern beschrieben werden. Die Rekonstruktion komplexer, aggregierter Strukturen wird in Kapitel 6 unter Verwendung der hier vorgestellten Methode erläutert.

Wegen der für die Rekonstruktion von Fassadenteilen typischen großen Zahl von Outliern wird in Abschnitt 4.1 der robuste Schätzer *MOSAP* (Model-Based Sampling and Prediction) eingeführt. Er verfolgt das hypothesize-and-verify Konzept (vgl. Abschnitt 2.2.4, S. 20) und führt eine modellbasierte Samplingstrategie sowie eine neue Art der Modellbewertung ein. Durch die systematische Verwendung des quantifizierten Vorwissens werden die Stichproben modellbasiert gezogen und Modelle durch das Gütemaß der *Prädiktionsgüte* bewertet. Die zu schätzenden Modelle zeichnen sich durch ihre einfache Geometrie aus und benötigen somit Samples von geringer Größe.

Die in diesem Kapitel beispielhaft vorgestellten Modelle zum Schätzen von Treppen (Abschnitt 4.2) und Fenstern (Abschnitt 4.3) werden durch die detaillierte Analyse der Geometrie der Objekte entwickelt und teilweise durch Anwendung maschineller Lernverfahren optimiert.

4.1 MOSAP - Modellbasiertes Sampling und Prädiktion

Die einzelnen Teilobjekte einer Fassade werden häufig durch einen relativ kleinen Teil der 3D-Punktwolke beschrieben. Dementsprechend schwer ist es, diese mit dem klassischen RANSAC-Vorgehen (vgl. Abschnitt 2.2.4, S. 20) mit zufälligem Sampling und Hypothesenbewertung durch Größe des Consensus-Sets zu rekonstruieren. Lokales Sampling (Schnabel et al., 2008) steigert zwar die Wahrscheinlichkeit ein Sample aus Inliern zu ziehen, zur Modellbewertung müssen dennoch die Abstände zu allen Punkten, auch zur großen Zahl von Outliern berechnet werden.

Basierend auf der Arbeit von Schmittwilken und Plümer (2010) wird das Konzept Modellbewertung durch Prädiktion (vgl. Abschnitt 4.1.2) aufgegriffen und zusammen mit der in Abschnitt 4.1.1 vorgestellten modellbasierten Samplingstrategie im Algorithmus MOSAP vereint.

Listing 4.1 zeigt den MOSAP-Algorithmus im Pseudocode. Das modellbasierte Sampling (Zeilen 10 und 11) erfolgt durch Stochastic Universal Sampling (SUS), das im nächsten

```
1 function m = mosap(D, M, a, n) {
2   input
3     D // Daten, 3D-Punktwolke
4     M // Modell
5     a // Faktor für lagebasiertes Sampling
6     n // Anzahl zu prüfender Modellinstanzen
7   output
8     m // Modellinstanz mit höchster Prädiktionsgüte
9
10  L = a * n Samples aus D durch lagebasiertes SUS mit W aus M
11  F = n Samples aus L durch formbasiertes SUS mit W aus M
12
13  forall f in F
14    mf = Parameter der Modellinstanz aus f und M
15    qf = Prädiktionsgüte für mf
16  }
17
18  return m = mi mit qi = max({q1, q2, ... qn})
19 }
```

Listing 4.1: Pseudocode des Algorithmus zur Rekonstruktion durch Prädiktion: MOSAP (Model-Based Sampling and Prediction)

Abschnitt näher erläutert wird. Es erfolgt hierarchisch aufgeteilt in lage- sowie formbasiertes Sampling. Für alle Elemente f der Stichprobe F wird eine Modellinstanz m_f berechnet (Zeile 14) und dann durch ihre Prädiktionsgüte q_f bewertet (Zeile 15). Schließlich wird die Modellinstanz mit der höchsten Prädiktionsgüte zurückgegeben (Zeile 18).

Der Parameter a wurde eingeführt, um die Repräsentativität der Samples in F zu verbessern. Empirisch wurde ein Wert von $a = 1000$ ermittelt. Wird beispielsweise eine Stichprobe von $n = 50$ Punktpaaren benötigt, so werden zunächst 50 000 Punktpaare lagebasiert gezogen, aus denen dann schließlich 50 Punktpaare formbasiert gewählt werden.

Zunächst wird eine Stichprobe L durch lagebasiertes Sampling aus den Eingangsdaten D (Zeile 10) und anschließend die Stichprobe F durch formbasiertes Sampling aus L (Zeile 11) gezogen. Das lage- und formbasierte Sampling erfolgt durch *Stochastic Universal Sampling* (SUS), das im nächsten Abschnitt näher erläutert wird. Die von SUS benötigte Wahrscheinlichkeitsdichte W ist im Modell M kodiert.

Im Gegensatz zum RANSAC-Algorithmus wird die Modellinstanziierung sowie -bewertung (Zeilen 14 und 15) nur für vorab ausgewählte Samples durchgeführt, die mit hoher Wahrscheinlichkeit ausschließlich aus Inliern bestehen.

4.1.1 Modellbasiertes Sampling

Aufgrund der zu erwartenden großen Anzahl von Outliern ist es das Ziel des modellbasierten Samplings, durch das Vorwissen über die Lage- und Formparameter eines Objekts die Teilmenge der 3D-Punktwolke zu identifizieren, von der das Objekt beschrieben wird.

Wegen der einheitlichen Orientierung der Punktwolken (vgl. Abschnitt 2.1.1) können die in Abschnitt 3.4.2 und Anhang A vorgestellten Dichten der Koordinatenwerte und Formparameter herangezogen werden. Mithilfe einer angepassten Version des *Stochastic Universal Sampling* (SUS, Baker, 1987) wird dann die Teilmenge der 3D-Punktwolke bestimmt, die zur weiteren Interpretation betrachtet wird. Da SUS im Bereich der evolutionären Algorithmen entwickelt wurde, wird die Güte eines Samples dort als *Fitness* bezeichnet. Wegen der hier verwendeten Wahrscheinlichkeitsdichte der Lage- und Formparameter wird die Wahrscheinlichkeit p als Gütemaß verwendet.

Wegen des hierarchischen Ziehens von Stichproben in MOSAP wird das modellbasierte Sampling in *lagebasiertes* sowie *formbasiertes* Sampling unterteilt. Es werden hierzu zwei nachfolgenden beschriebenen Wahrscheinlichkeiten unterschieden. Bei gegebener Klasse k wird zunächst eine Stichprobe entsprechend der Lagewahrscheinlichkeit eines Punktes \mathbf{x} gezogen (Zeile 13), die sich aus dem Produkt der Wahrscheinlichkeiten seiner Koordinatenwerte (x_1, x_2, x_3) berechnet:

$$P_{s,l}(\mathbf{x} | k) = P_x(x_1 | k) P_y(x_2 | k) P_z(x_3 | k). \quad (4.1)$$

Anschließend erfolgt das formbasierte Sampling (Zeile 14). Hierzu werden die Formparameter f_i mit $i \in [1, n]$ der aus dem Sample \mathbf{x}^j mit $j \in [1, m]$ abgeleiteten Modellinstanz bestimmt und die Wahrscheinlichkeit der Modellinstanz nach dem Produkt der Wahrscheinlichkeiten der Formparameter berechnet:

$$P_{s,f}(\mathbf{x}^1, \mathbf{x}^2, \dots, \mathbf{x}^m | k) = \prod_{i=1}^n P(f_i | k). \quad (4.2)$$

Die Wahrscheinlichkeitsdichten der einzelnen Klassen k sind in Anhang A zusammengestellt. Listing 4.2 zeigt den Pseudocode dieses Sampling-Algorithmus. Zunächst wird eine Stichprobe der Größe n zufällig und gleichverteilt aus D gezogen (Zeile 9) und die Wahrscheinlichkeiten p_i der Elemente r_i des Samples bestimmt. Hierzu werden in Abhängigkeit des Aufrufs von SUS aus MOSAP sowie der Klasse k die Wahrscheinlichkeiten entsprechend Gleichung 4.1 oder Gleichung 4.2 bestimmt. Anschließend werden die n Auswahlpunkte m_k durch die Zufallszahl z festgelegt und die entsprechenden Elemente r_j aus R gewählt. Durch eine entsprechende Datenstruktur für die kumulativen Auswahlwahrscheinlichkeiten u_i wie beispielsweise ein binärer Suchbaum ist diese Auswahl effizient. Die Wahrscheinlichkeit der Auswahl eines Elementes r_i ist proportional zu seiner Wahrscheinlichkeit p_i . Somit wird die Wahrscheinlichkeit, ein richtiges Sample zu wählen durch SUS gesteigert.

Aufgrund der Verwendung der kumulativen Auswahlwahrscheinlichkeit $u_i \in [0, 1]$ (Zeile 14) und durch die Definition der n Auswahlpunkte mit $m_i \in [0, 1]$ (Zeile 20) entspricht SUS dem einmaligen Drehen eines „Glücksrads“ mit n gleichabständigen Zeigern und benötigt so nur eine auf dem Intervall $[0, 1]$ gleichverteilte Zufallsvariable z (Zeile 17).

4.1.2 Modellbewertung durch Prädiktion

Nach der Selektion der Samples im vorherigen Schritt werden entsprechend des MOSAP-Algorithmus nun die Modellinstanzen berechnet und bewertet. Im Folgenden wird die

```
1 function S = sus(D, W, n){
2   input :
3     D // Daten
4     W // Wahrscheinlichkeitsdichte
5     n // Größe der Stichprobe
6   output :
7     S // Stichprobe der Größe n aus D
8
9   R = n Elemente zufällig und gleichverteilt aus D
10
11  forall r in R {
12    pi = W(r) //Wahrscheinlichkeit von r
13    ui = ui-1 + pi //kumulative Auswahlwahrscheinlichkeit
14  }
15
16  z = rand(0,1)
17
18  for k = 1 : n {
19    mk = z + (k / n) //Auswahlpunkt
20    if mk > 1
21      mk = mk - 1
22    sk = wähle rj aus R mit uj-1 < mk ≤ uj
23  }
24
25  return S = {s1, s2, ... sn}
26 }
```

Listing 4.2: Pseudocode des adaptierten *Stochastic Universal Sampling* (SUS) zum Ziehen einer Stichprobe von n Elementen

Bewertung der Modellinstanzen thematisiert und die Prädiktionsgüte als Bewertungsmaß eingeführt.

Ebenso wie beim RANSAC-Algorithmus ist die Grundannahme der Bewertung hier, dass die Modellinstanz, die durch die meisten Punkte beschrieben wird, die Beste ist. Um aber die Abstandsberechnung zur großen Zahl von Outliern zu vermeiden, wird lediglich in der Teilmenge der 3D-Punktwolke nach Inliern gesucht, die durch die jeweilige Modellinstanz unter Berücksichtigung des Vorwissens über die Verteilung der Formparameter definiert wird. Diese Teilmenge wird durch einen achsparallelen Quader (Bounding Box, BBox) approximiert, dessen Lage und Größe aus der Modellinstanz hergeleitet wird. Die durch die BBox eingeschriebene Teilmenge der 3D-Punktwolke wird als *Prädiktion* bezeichnet. Da die prädierten Punkte auf dem Objekt liegen, wird die Größe der Teilmenge als Kriterium zur Bewertung der Güte eines Modells verwendet werden. Dies wird hier entsprechend als *Prädiktionsgüte* bezeichnet. Ein Objekt wird demnach am besten durch die Modellinstanz mit der höchsten Prädiktionsgüte approximiert. Oder umgekehrt:

Die Modellinstanz mit der höchsten Prädiktionsgüte ist der beste Schätzer für das gesuchte Objekt.

Wegen der Orientierung der 3D-Punktwolken, der vornehmlich orthogonalen Konstruktion von Objekten und der Definition der Prädiktion durch achsparallele BBoxen kann das Prädizieren sehr effizient durch räumliche Datenstrukturen wie *kd-Baum* oder *Oktree* (Klein, 2005; Meagher, 1982) realisiert werden. Eine Prädiktion erfordert daher wesentlich weniger Rechenaufwand, als die meistens verwendete Bestimmung des Consensus-Sets durch Berechnung der Abstände zum Modell.

In den folgenden beiden Abschnitten wird die Rekonstruktion von Treppen (Abschnitt 4.2) und Fenstern (Abschnitt 4.3) unter Verwendung des MOSAP-Algorithmus vorgestellt.

4.2 Rekonstruktion von Treppen mit MOSAP

Im Folgenden wird die Verwendung des MOSAP-Algorithmus zur Rekonstruktion von Treppen aus 3D-Punktwolken erläutert. Dazu wird in Abschnitt 4.2.1 zunächst das verwendete Modell für Treppen vorgestellt. Anschließend wird in den Abschnitten 4.2.2 und 4.2.3 das lage- und formbasierte Sampling präsentiert. Nach der Darstellung der Bewertung von Treppenmodellen durch Prädiktion (Abschnitt 4.2.4) und der Diskussion der noch unbestimmten Parameter in Abschnitt 4.2.5 folgen empirische Ergebnisse.

4.2.1 Das Treppen-Modell

In diesem Abschnitt wird das hier verwendet Modell zur Beschreibung von Treppen vorgestellt, das sowohl das modellbasierte Sampling als auch die Prädiktion der Inlier unterstützt.

Um die bekannten Wahrscheinlichkeitsdichten der Formparameter nutzen zu können, gleichzeitig aber sicherzustellen, dass die Prädiktion durch die Verwendung achsparalleler BBoxen effizient ist, werden zueinander parallele und orthogonale Ebenen zur Definition des Modells verwendet. Dabei entspricht der Abstand zweier paralleler Ebenen stets einem Formparameter der Treppe. Die Reduktion der Ebenen zu parallelen Maschen erfolgt dann in einem nachgeordneten Schritt.

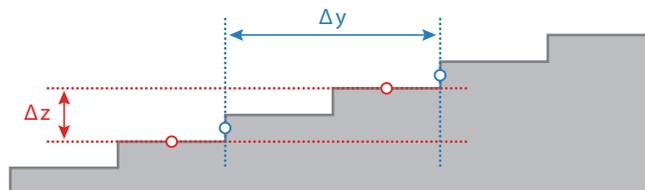


Abbildung 4.1: 2D-Projektion des Treppenmodells: parallele, gleichabständige Ebenen. Ein Sample besteht aus vier Punkten: Zwei auf horizontalen, zwei auf vertikalen Ebenen

So ist das Modell der Treppe zunächst durch zwei Mengen von Ebenen definiert: Einer Menge A bestehend aus parallelen, gleichabständigen, horizontalen Ebenen, in denen die

Auftritte der Treppe liegen, sowie einer Menge S bestehend aus parallelen, gleichabständigen, vertikalen Ebenen, in denen die Steigungen der Treppe liegen. Die Ebenen A und S stehen demnach senkrecht aufeinander. Die Modellannahme der Gleichabständigkeit basiert auf der in Abschnitt 3.2.3 (S. 49) diskutierten Annahme, dass sich die Auftrittstiefe sowie die Steigung innerhalb eines Treppenlaufs nicht ändert. Abbildung 4.1 zeigt dies in der 2D-Projektion.

Die Breite der Treppe ist demnach kein Modellparameter und wird erst im Anschluss an die Rekonstruktion dieses Modells aus der Menge von Inliern bestimmt. Abschnitt 4.2.5 zeigt das entsprechende Verfahren.

Das Treppenmodell kann durch $k = 4$ Punkte der 3D-Punktwolke eindeutig instanzieren zu können. Zwei Punkte werden dazu auf unterschiedlichen horizontalen Ebenen und zwei Punkte auf unterschiedlichen vertikalen Ebenen angenommen.

Das Modell schließt auch gewendelte Treppen ein. Lediglich bei der Betrachtung des Samples der vertikalen Ebenen ist nicht der inkrementelle Abstand der vertikalen Ebenen zu betrachten, sondern eine Inkrementierung des Winkels, den die Ebenen zueinander haben.

4.2.2 Lagebasiertes Sampling

Der erste Schritt des MOSAP-Algorithmus ist die Bestimmung der Teilmenge der Daten, die aufgrund ihrer *Lage* mit hoher Wahrscheinlichkeit Inlier sind.

Treppen verbinden zumeist Zuwege mit dem Gebäude und enden vor Türen. Sie befinden sich demnach *vor* dem Gebäude in *niedriger* Höhe. Ihre Position kann also gut durch die y - sowie z -Koordinate eingeschränkt werden. Die Schätzung der entsprechenden Wahrscheinlichkeitsdichte $p_y(x)$ und $p_z(x)$ ist in Abbildung 4.2(a) gezeigt. Wegen der Orientierung der Punktwolken und der daraus resultierenden Lage der Treppen entspricht die Dichte der y -Koordinaten eben der Dichte der Tiefe und die Dichte der z -Koordinaten der Höhe.

Wegen der Fassaden zugrunde liegenden Symmetrie liegen Eingänge in der Mitte eines Gebäudes oder an einer der beiden Seiten. Wie Abbildung 4.2(b) zeigt, kann diese Symmetrieannahme aufgrund des quantifizierten Vorwissens bestätigt werden. Demnach kann die Position von Treppen auch hinsichtlich der x -Koordinate eingeschränkt werden. Für die entsprechende Dichte $p_x(x)$ wird eine Gauß'sche Mischverteilungen angenommen, deren Moden in der Mitte und an den Seiten des Gebäudes liegen (vgl. Abbildung 4.3).

Da außer den in Abbildung 4.2(b) dargestellten Informationen keine empirischen Daten über die Lage von Türen vorliegen werden folgende Annahmen getroffen: Die Mittelwerte der beiden „äußeren“ Moden errechnen sich aus mittlerer Breite von Eingangstüren von 1,3 m und dem mittleren Abstand zwischen Türen und Gebäudeseite von 80 cm (vgl. Anhang A, S. 115). Es ergibt sich $d = 1,45$ [m]. Als Standardabweichung für die Lage der Tür wird die halbe durchschnittliche Türbreite $\sigma = 0,65$ [m] angenommen. Mit der maximalen Ausdehnung in x -Richtung b ergibt sich

$$p_x(x) = 0,46 \mathcal{N}(x, \mu = d, \sigma) + 0,04 \mathcal{N}(x, \mu = \frac{b}{2}, \sigma) + 0,51 \mathcal{N}(x, \mu = b - d, \sigma).$$

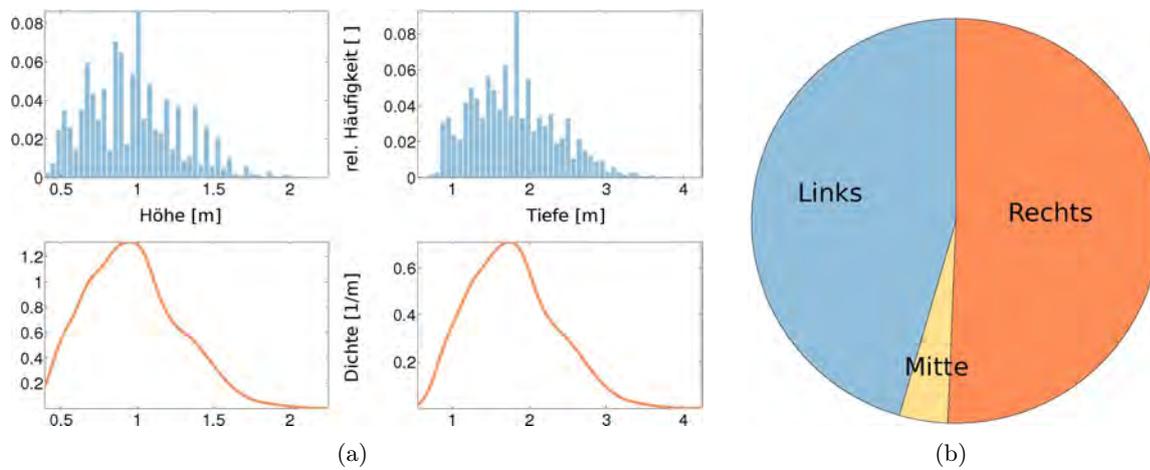


Abbildung 4.2: Abgeleitete Verteilungen für Treppen (a): Häufigkeitsverteilung (blau) und geschätzte Dichte (orange) der Treppenhöhe (links) und Tiefe der Treppe (rechts) sowie die Häufigkeitsverteilung der Lage von Türen (b)

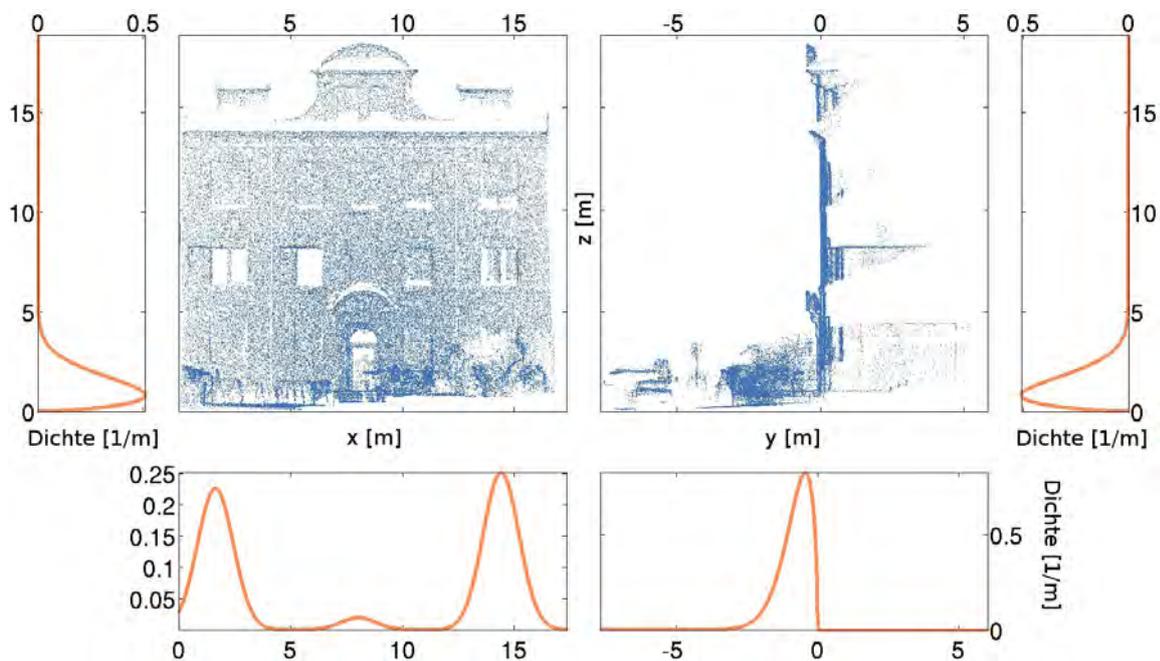


Abbildung 4.3: Wahrscheinlichkeitsdichte der Koordinatenwerte (orange) für Treppen und 2D-Projektion der 3D-Punktwolke (blau)

Die Faktoren ergeben sich aus Abbildung 4.2(b). Unter Verwendung von SUS wird eine Teilmenge der 3D-Punktwolke bestimmt, deren Punkte $\mathbf{x} = (x_1 \ x_2 \ x_3)^T$ entsprechend ihrer Wahrscheinlichkeit

$$P_{s,l}(\mathbf{x}) = P_x(x_1) P_y(x_2) P_z(x_3) \quad (4.3)$$

gezogen wurden. Abbildung 4.3 zeigt zwei Projektionen der 3D-Punktwolke in blau und die entsprechenden Wahrscheinlichkeitsdichten in orange.

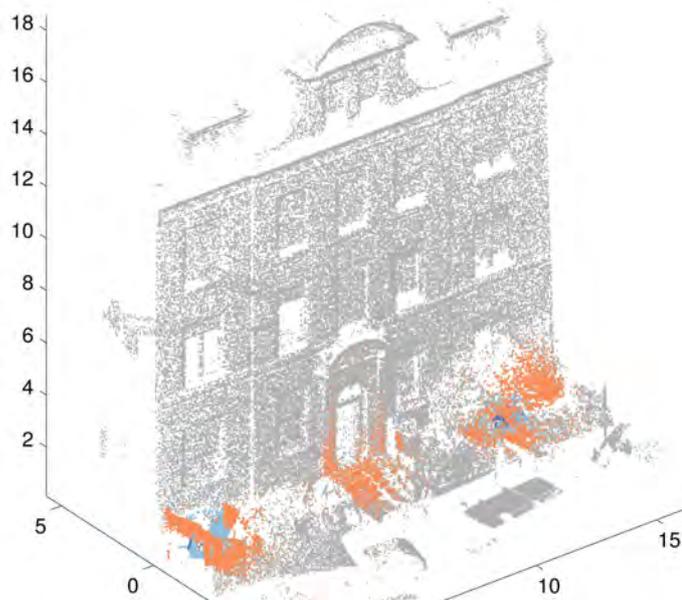


Abbildung 4.4: Entsprechend der Lagewahrscheinlichkeit gefilterte 3D-Punktwolke: Nicht selektierte Punkte in grau und selektierte Punkte farbig mit zunehmender Wahrscheinlichkeit von orange über hell blau zu dunkel blau.

Abbildung 4.4 zeigt das Ergebnis des Samplings aus Lageparametern für ein Gebäude mit mittigem Eingang. Hier zeigt sich die Stärke des Samplingverfahrens: Trotz der sehr geringen Wahrscheinlichkeit eines Eingangs in der Mitte des Gebäudes (Abbildung 4.3 links unten) werden genügend viele Punkte an dieser Stelle ausgewählt.

4.2.3 Formbasiertes Sampling

Nach dem lagebasierten Sampling zur Elimination eines Großteils der Outlier im vorherigen Schritt folgt nun das *formbasierte* Sampling zur Bestimmung der Menge an Samples, aus denen Modellinstanzen berechnet und bewertet werden.

Ohne Beschränkung der Allgemeinheit werden im Folgenden die beiden Punkte betrachtet, die auf den Auftritten, also auf horizontalen Ebenen, angenommen werden. Die gemachten Überlegungen können entsprechend auf die vertikalen Ebenen übertragen werden.

Befinden sich die beiden Punkte z_1 und z_2 , aus denen das Treppenmodell (vgl. Abbildung 4.1) instanziiert werden soll, in allgemeiner Lage, ist also nicht bekannt, auf *welchen* Ebenen sie

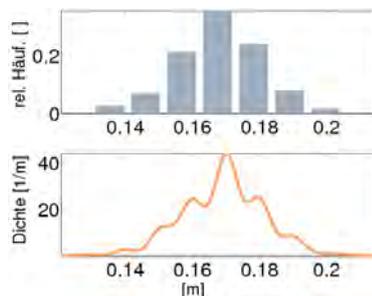


Abbildung 4.5: Steigung von Treppen als Häufigkeitsverteilung (blau, Intervallbreite 1 cm) und geschätzte Dichte (orange)

sich befinden, so ist zunächst einzig die Höhendifferenz Δz bekannt. Die Bestimmung des Treppenparameters Steigung s stellt sich demnach als gemischt-ganzzahliges Problem mit der Anzahl von Steigungen n dar:

$$\Delta z = n s \text{ mit } n \in \mathbb{N} \text{ und } \Delta z, s \in \mathbb{R}. \quad (4.4)$$

Zur Lösung wird die in Abbildung 4.5 gezeigte Dichte der Steigung herangezogen. Werden die aus den Messungen von ca. 200 Treppen ermittelten Extrema der Steigungen $s_{\min} = 0,13$ cm und $s_{\max} = 0,21$ cm in Gleichung 4.4 eingesetzt, so ergeben sich Schranken für die Anzahl der Stufen

$$n_{\min} = \frac{\Delta z}{s_{\max}} \text{ und } n_{\max} = \frac{\Delta z}{s_{\min}}$$

und wegen der Ganzzahligkeit von n

$$n_{\min} = \left\lceil \frac{\Delta z}{s_{\max}} \right\rceil \text{ und } n_{\max} = \left\lfloor \frac{\Delta z}{s_{\min}} \right\rfloor.$$

Schmittwilken et al. (2007) zeigen, wie dieses *Constraint Satisfaction Problem* (CSP, Apt, 2006) durch den Einsatz von *Constraint Logic Programming* (CLP, Apt und Wallace, 2007) mit einer minimalen Anzahl von Beobachtungen gelöst werden kann.

Schmittwilken und Plümer (2009) integrieren den oben gezeigten Ansatz in ein RANSAC-basiertes Verfahren zur Rekonstruktion von Treppen aus 3D-Punktwolken. Sie Schätzen vorab mittels PCA und der nächsten Nachbarn die Orientierung der lokalen, als planar angenommenen Umgebung eines Punktes. Das Sampling wird dort ausschließlich auf Punkten mit vertikaler Normalenrichtung durchgeführt.

Im Folgenden bleibt die Schätzung der Parameter vorerst außen vor. Stattdessen wird eine weniger allgemeine Formulierung des Modells vorgenommen, die für die beiden Punkte eines Punktpaars annimmt, dass sie auf der l -ten und der $(l + 2)$ -ten Ebene liegen (vgl. Abbildung 4.1). Somit ist n aus Gleichung 4.4 mit $n = 2$ bekannt, und das Sample wird in SUS anhand der Wahrscheinlichkeit des Höhenunterschied $P_s(\frac{\Delta z}{2})$ (vgl. Abbildung 4.5) bewertet.

Da wegen des Modells der parallelen, horizontalen Ebenen, lediglich die Wahrscheinlichkeit von Δz bewertet werden kann, die Lage der beiden Punkte innerhalb der jeweiligen Ebene aber zunächst beliebig ist, wird das Sample räumlich begrenzt. Es wird die Wahrscheinlichkeit der Koordinatendifferenzen in x - und y -Richtung durch Normalverteilungen beschrieben, deren Standardabweichung dem Doppelten der durchschnittlichen Auftrittstiefe bzw. der halben durchschnittlichen Treppenbreite entspricht

$$\sigma_y = \frac{\mu_t}{2} \quad \text{bzw.} \quad \sigma_z = \frac{\mu_b}{2}.$$

Somit haben nur solche Punktpaare eine hohe Wahrscheinlichkeit, deren Höhenunterschied in etwa dem von zwei Treppenstufen entspricht, die in y -Richtung ungefähr so weit auseinander liegen, wie zwei Treppenstufen tief sind und die auch in x -Richtung nicht weiter auseinander liegen, als eine halbe Treppe breit ist.

4.2.4 Prädiktionsgüte

Wegen der angenommenen Lage der beiden Sample-Punkte \mathbf{x}^1 und \mathbf{x}^2 auf einem Auftritt und dem übernächsten Auftritt, kann eben der dazwischen liegende Auftritt \mathbf{x}^p prädiziert werden

$$\mathbf{x}^p = \frac{\mathbf{x}^1 + \mathbf{x}^2}{2}.$$

Zur Steigerung der Effizienz entspricht die Prädiktion der Anfrage an eine räumliche Datenstruktur. Es wird unter Verwendung der angenommenen Beobachtungsgenauigkeit von 1 mm der Bereich angefragt, der in z -Richtung definiert ist durch

$$z_{\min} = x_3^p - 0,001 \quad \text{und} \quad z_{\max} = x_3^p + 0,001.$$

Für die Beschränkung in x - und y -Richtung wird die durchschnittliche Breite μ_b und Tiefe μ_t von Treppen angehalten:

$$\begin{aligned} x_{\min} &= x_1^p - \mu_b & \text{und} & & x_{\max} &= x_1^p + \mu_b \\ x_{\min} &= x_2^p - \mu_t & \text{und} & & x_{\max} &= x_2^p + \mu_t. \end{aligned}$$

Abbildung 4.6 zeigt in einer 2D Projektion das Sample als orange Punkte, das geometrische Mittel als hell blauen Punkt, welcher von den prädizierten Punkten (dunkel blau) umgeben ist. Die Prädiktion in der geometrischen Mitte der beiden Samples hat den offensichtlichen Vorteil, dass die prädizierten Punkte nicht außerhalb des eigentlichen Objekts liegen. Würden Punkte auf zwei aufeinanderfolgenden Auftritten als Sample verwendet, dann wäre die Prädiktion als Extrapolation dieses Treppenmodells zu verstehen und ggf. sogar leer. Dies würde zu einer geringen Prädiktionsgüte führen.

4.2.5 Schätzen unbestimmter Parameter

Bisher wurde gezeigt, wie Modellwissen in das Sampling integriert werden kann, und wie Modellhypothesen effizient durch Anfragen an eine raumbezogene Datenstruktur verifiziert

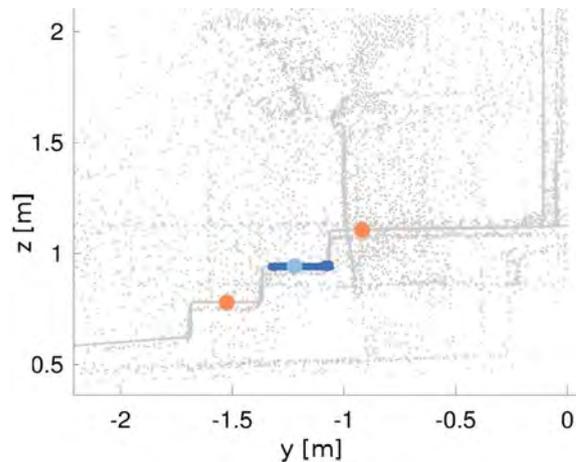


Abbildung 4.6: yz -Projektion der lagebasiert gezogenen Stichprobe (grau), wei Punkte des Samples (orange), deren geometrisches Mittel (hell blau) sowie die prädizierten Punkte (dunkel blau)

werden können. Wegen der einfachen Modelle sind bisher jedoch nur einige Lage- und Formparameter bestimmt.

Zur eindeutigen Rekonstruktion der Treppe müssen noch die Anzahl der Stufen sowie die Breite der Treppe bestimmt werden.

Da die Treppenparameter Steigung und Auftrittstiefe bereits geschätzt wurden, und mit den entsprechenden Samples und Prädiktionen auch die ungefähre Lage der Treppe bekannt ist, können Anfang und Ende der Treppe wegen der angenommenen Konstanz von Auftrittstiefe und Steigung durch weitere iterative Prädiktionen nach oben/ unten bzw. vorne/ hinten bestimmt werden. Ausgehend vom oberen Punkt des „horizontalen“ Samples werden durch BBoxen, die so proportioniert sind, wie die zur Prädiktion verwendeten, Teilmengen der 3D-Punktswolke definiert, die um die geschätzte Auftrittstiefe in y -Richtung und die geschätzte Steigung in z -Richtung entfernt liegen. Wenn diese Teilmengen hinreichend viele Punkte enthalten werden sie als weitere Treppenstufe klassifiziert. So wird die Treppe stufenweise exploriert.

Dehbi und Plümer (2010) zeigen ein Konzept zur Schätzung der Treppenbreite durch zwei Parameter einer vierparametrischen Beta-Verteilung. Hier wird die Breite der Treppe jedoch durch ein Clustering bestimmt. Dazu werden die als Auftritt klassifizierte Punkte jeder Ebene mithilfe von *dbscan* (s. Abschnitt 2.2.4, Ester et al., 1996) analysiert und das Cluster mit den meisten Punkten als Auftritt bzw. Steigung angenommen. Wird die Mindestanzahl an Punkten pro Cluster m entsprechend hoch und der Abstand ϵ niedrig gewählt, so werden die Punkte auf Objekten neben der Treppe heraus gefiltert. Die Breite der Treppe wird dann schließlich als Differenz der Mittelwerte der minimalen und maximalen x -Koordinaten jedes Clusters angenommen. Die empirisch ermittelten Werten von $\epsilon = 0.1$ und $m = 10$ erwiesen sich als passend für diese Aufgabe.

4.2.6 Ergebnisse

MOSAP wurde in MATLAB implementiert und mit einem entsprechenden Modell für Treppen auf die vorliegenden 3D-Punktwolken der Bonner Südstadt angewendet. In den empirischen Untersuchungen wurden Test- und Trainingsdaten derart getrennt, dass die an den getesteten Gebäuden ermittelten Parameter nicht zur Schätzung der verwendeten Wahrscheinlichkeitsdichten herangezogen wurden.

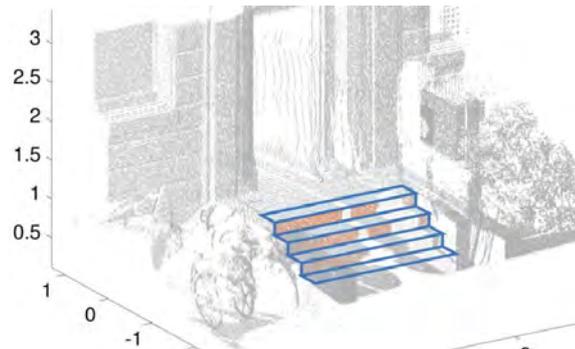


Abbildung 4.7: Rekonstruktion der Treppe: Hervorgehoben sind die Punkte, die als *Auftritt* (blau) und *Steigung* (orange) klassifiziert wurden.

Obwohl die zur Verfügung stehenden Punktwolken vom Dach eines Messbusses aufgenommen wurden, waren wegen der Verdeckung durch Hecken und Zäune lediglich in sieben Datensätzen Treppen zu erkennen und zu rekonstruieren. Die durchschnittliche Abweichung für die geschätzten Parameter Auftrittstiefe und Steigung lagen bei 0,4 cm und 0,6 cm. Abbildung 4.7 zeigt beispielhaft die Rekonstruktion der Treppe für einen der Datensätze. Dargestellt sind neben der geschätzten Form der Treppe auch die als Auftritt und Steigung klassifizierten Punkte.

4.3 Rekonstruktion von Fenstern mit MOSAP

Die im vorherigen Abschnitt gezeigte Schätzung von Treppen mit MOSAP lässt sich kanonisch auf die Schätzung von Fenstern übertragen. Dies wird im Folgenden gezeigt.

Auch für Fenster wird ein Modell zweier paralleler Ebenen gewählt. Jedoch reicht hier die Betrachtung der Wahrscheinlichkeit des Abstandes der Ebenen nicht aus, um ein Fenster zu identifizieren. Daher werden weitere Merkmale zur Beschreibung der lokalen Umgebung eines Punktes vorgestellt, anhand derer Punkte hinsichtlich ihrer Lage auf Laibungen bewertet werden können. Mit maschinellen Lernverfahren werden schließlich die am besten geeigneten Merkmale identifiziert.

4.3.1 Das Fenstermodell

Das zur Rekonstruktion einzelner Fenster verwendete Modell besteht aus zwei parallelen, vertikal orientierten Ebenen, in denen die beiden Laibungen eines Fensters liegen. Demnach

entspricht der Abstand der beiden Ebenen genau der Fensterbreite. Darüber hinaus wird angenommen, dass die Laibungen senkrecht auf der Fassadenfläche stehen und die beiden Ebenen somit parallel zur yz -Ebene orientiert sind.

Die Approximation der Laibungen durch planare Flächen ist hinreichend genau, auch wenn die konkrete Ausprägung einer Laibung nicht als planar angenommen werden kann. In Abschnitt 4.3.3 wird gezeigt, dass auch Laibungen, deren „Grundriss“, also die Projektion in die xy -Ebene, einen Bogen oder eine Stufe beschreibt, geschätzt werden können.

Durch die Aufnahmegeometrie terrestrischen Laserscannings, sind die unteren Bereiche der Laibungen sowie die Fensterbank in oberen Stockwerken abgeschattet und somit nicht beobachtet. Wegen des sehr geringen Anteils an der Fläche der Laibungen ist deren Abschattung zunächst nicht relevant. Die gänzliche Abschattung der Fensterbänke hat zur Folge, dass die Analogie zur Schätzung von Treppen nicht auf die Schätzung der Fensterhöhe durch parallele horizontale Ebenen übertragen werden kann. Dies wird in Abschnitt 4.3.5 aufgegriffen.

4.3.2 Lagebasiertes Sampling

Auch für die Rekonstruktion von Fenstern lässt sich durch Berücksichtigung der Wahrscheinlichkeitsdichte der Lageparameter im Sampling eine Reduktion der 3D-Punktwolke erreichen.

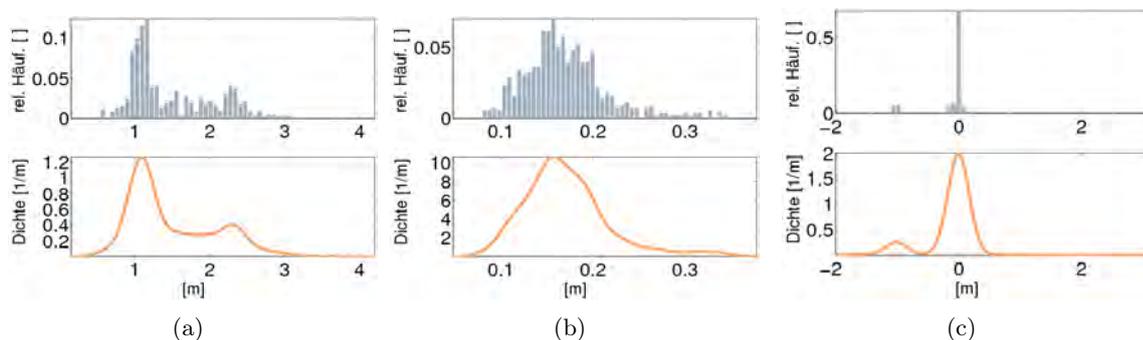


Abbildung 4.8: Häufigkeitsverteilung als Histogramm (blau) und geschätzte Dichte (orange):
 (a) Breite von Fenstern (Intervallbreite 6,5 cm),
 (a) Tiefe von Fenstern (Intervallbreite 5 mm),
 (c) y -Koordinaten des Referenzpunkts von Fenstern (Intervallbreite 8,2 cm)

Fenster liegen *hinter* der vertikalen Ebene der Fassade. Abbildung 4.8(b) zeigt die Häufigkeitsverteilung der Tiefe von Fenstern als Histogramm (blau) und die Dichte in orange. Demnach haben die meisten Fenster eine Tiefe bzw. Laibungsstärke von ca. 10 cm bis 25 cm; sie erstrecken sich also von der Fassadenebene bis ca. 25 cm in das Gebäude hinein.

Wegen der beliebigen Lage in x - oder z -Richtung lassen sich Stichproben zur Schätzung von Fenstern nur bzgl. ihrer y -Koordinaten bewerten. Da die Laibung wegen der Orientierung der Punktwolken in einer Parallelen zur yz -Ebene liegt, werden die y -Koordinaten x_2 der Punkte

\mathbf{x} betrachtet und ihre Wahrscheinlichkeit aus der Dichte der Fenstertiefe $p_t(x)$ bestimmt

$$P_{s,l}(\mathbf{x}) = \int_{x_2-\epsilon}^{x_2+\epsilon} p_t(x) dx.$$

Die zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeit gewählte Intervallbreite entspricht der doppelten Messgenauigkeit: $\epsilon = 1$ [mm].

Abbildung 4.9(b) zeigt die mit SUS gezogene Stichprobe (farbig) zusammen mit der 3D-Punktwolke (grau). Am Fenster ganz rechts im ersten Obergeschoss ist sehr gut zu erkennen, dass die Punkte auf der Laibung eine höhere Güte haben (dunkel blau) als die Punkte, die auf dem dahinter liegenden Rollo gemessen wurden (hell blau). Das entspricht eben der Dichte, die bei ca. 17 cm ihr Maximum hat.

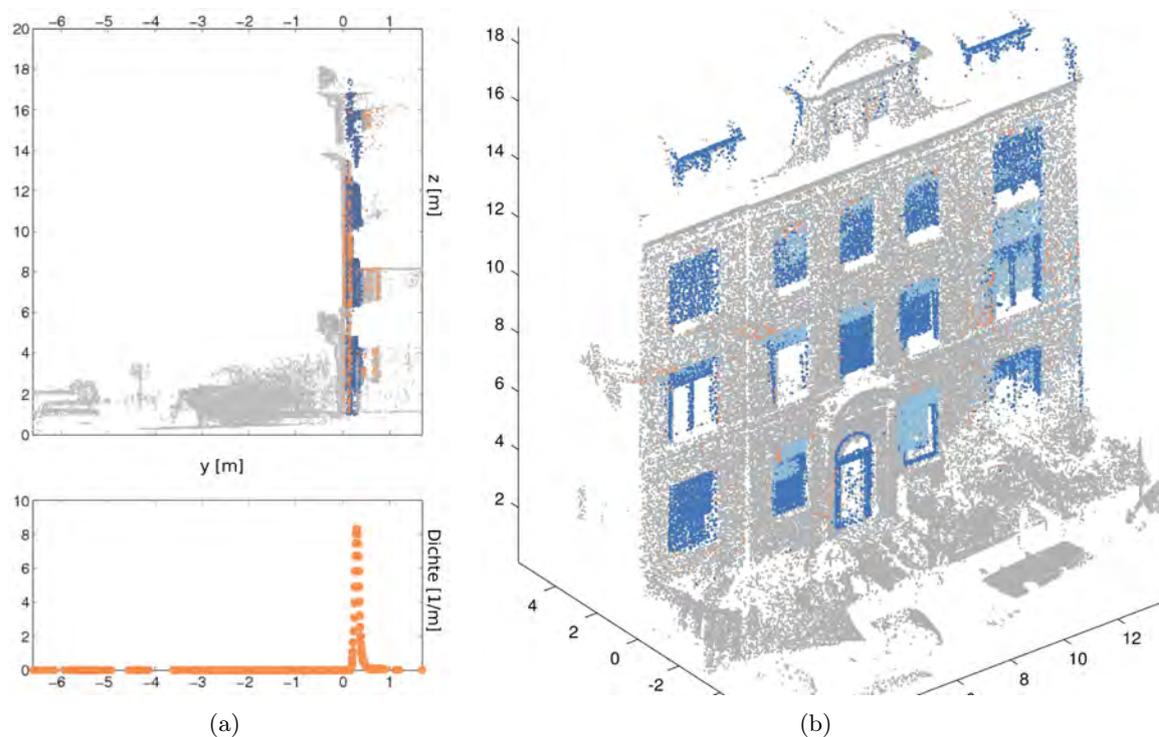


Abbildung 4.9: (a) yz -Projektion der 3D-Punktwolke (oben) und Wahrscheinlichkeitsdichte der y -Koordinate von Fenstern. (b) Entsprechend gefilterte 3D-Punktwolke: Nicht selektiert Punkte in grau und selektierte Punkte farbig mit zunehmender Wahrscheinlichkeit von orange über hell blau zu dunkel blau

4.3.3 Formbasiertes Sampling

Wegen seiner einfachen Geometrie kann ein Fenstermodell durch ein Sample von $k = 2$ Punkten instanziiert werden. Die Wahrscheinlichkeit eines Samples berechnet sich auch hier aus dem Produkt der Wahrscheinlichkeiten der Modellparameter.

Die Wahrscheinlichkeitsdichte der Breite von Fenstern $p_{\Delta x}(x)$ ist bekannt (vgl. Abbildung 4.8(a)). Da sich die übrigen Formparameter Tiefe und Höhe nicht direkt aus der Modellinstanz ableiten lassen, wird analog zur Schätzung von Treppen (vgl. Abschnitt 4.2.3, S. 66) zur Bewertung eines Samples die Wahrscheinlichkeit der Differenz der y - und z -Werte betrachtet. Grundsätzlich dürfen die beiden Punkte des Samples in y -Richtung nicht weiter auseinander liegen, als Fenster tief sind und in z -Richtung nicht weiter als Fenster hoch sind. Im Sinne eines lokalen Samplings sollte die jeweilige Koordinatendifferenz 0 sein. Hierzu werden die Dichten $p_{\Delta y}(x)$ und $p_{\Delta z}(x)$ in erster Näherung als Normalverteilungen

$$p_{\Delta y}(x) = \mathcal{N}(\mu_{\Delta y}, \sigma_{\Delta y}) \quad \text{und} \quad p_{\Delta z}(x) = \mathcal{N}(\mu_{\Delta z}, \sigma_{\Delta z})$$

angenommen. Als Mittelwerte werden $\mu_{\Delta y} = \mu_{\Delta z} = 0$ verwendet. Die Standardabweichung $\sigma_{\Delta y}$ und $\sigma_{\Delta z}$ wird basierend auf der mittlere Tiefe t bzw. Höhe h eines Fensters als

$$\sigma_{\Delta y} = \frac{1}{3} \frac{t}{2} \quad \text{und} \quad \sigma_{\Delta z} = \frac{1}{3} \frac{h}{2}$$

angenommen. Es ergibt sich die Wahrscheinlichkeit eines Samples aus den Punkten \mathbf{x}^1 und \mathbf{x}^2 zu

$$P_{s,f}(\mathbf{x}^1, \mathbf{x}^2) = P_{\Delta x}(|x_1^1 - x_1^2|) P_{\Delta y}(|x_2^1 - x_2^2|) P_{\Delta z}(|x_3^1 - x_3^2|).$$

Aufgrund der so definierten Wahrscheinlichkeit werden durch SUS vor allem solche Samples gezogen, deren zwei Punkte so weit auseinander liegen, wie Fenster typischerweise breit sind, die sich aber bezüglich der anderen beiden Koordinatenachsen nicht stark unterscheiden.

Nun ist es nicht schwer in einer 3D-Punktwolke zwei Punkte mit ähnlichem y - und z -Wert zu finden, deren Abstand der Breite eines Fensters entspricht – nur leider liegen die wenigsten dieser Punktpaare auf Fensterlaibungen. Aus diesem Grund werden weitere *Merkmale* gesucht, die zusätzlich zur Bewertung des Samples herangezogen werden können.

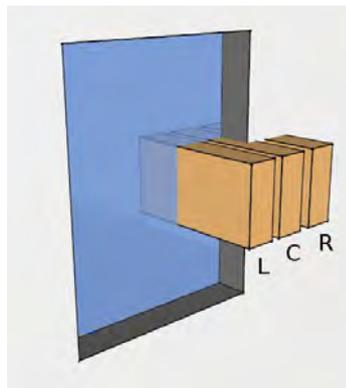


Abbildung 4.10: Zur lokalen Beschreibung der Laibung werden die drei BBoxen L, C und R betrachtet

Zur Beschreibung der lokalen Umgebung jedes der beiden Punkte des Samples, also der rechten und linken Fensterlaibung, werden jeweils drei BBoxen L, C und R definiert (vgl. Abbildung 4.10). Der Schwerpunkt der BBox C ist der Punkt des Samples, die BBoxen L

und R sind entlang der x -Achse nach links bzw. rechts gegenüber C um 20 cm verschoben. Die Kantenlängen der BBoxen wurden wie folgt festgelegt: 5 cm Breite (x -Richtung), 80 cm Tiefe (y -Richtung) und 20 cm Höhe (z -Richtung). Somit werden „schmale Streifen“ aus der Fassade „geschnitten“.

Die gewählte Breite von 5 cm ist der oben genannten Vielfalt der geometrischen Ausprägung von Laibungen geschuldet und daher deutlich höher als die Messgenauigkeit, die für als planar anzunehmende Flächen angehalten werden müsste. Um auch die Laibungen zu erfassen, die nicht orthogonal zur Fassadenfläche ausgerichtet sind oder in ihrem Grundriss geschwungen oder stufenförmig ausgeprägt sind, wird die BBox entsprechend breit gewählt.

Im Folgenden wird das weitere Vorgehen ohne Beschränkung der Allgemeinheit am Beispiel der rechten Fensterlaibung erläutert. Für die linke Fensterlaibung wird entsprechend verfahren.

Merkmal	Anzahl	Beschreibung
<i>Mittelwert</i>	9	Mittelwerte der x -, y - und z -Koordinaten von L, C und R
<i>Median</i>	9	Median der x -, y - und z -Koordinaten von L, C und R
<i>Varianz</i>	9	Varianz der x -, y - und z -Koordinaten von L, C und R
<i>Normale</i>	9	x -, y - und z -Komponenten des aus L, C und R abgeleiteten Normalenvektors
<i>WinkelFassade</i>	3	Winkel zwischen Normalenvektor von L, C und R und dem Normalenvektor der Fassade
<i>WinkelZenith</i>	3	Winkel zwischen Normalenvektor von L, C und R und dem Zenith
<i>WinkelHorizont</i>	3	Winkel zwischen Normalenvektor von L, C und R und der Horizontalen
<i>Winkel</i>	2	Winkel zwischen den Normalenvektoren L und C bzw. R und C
<i>VerhältnisAnzahl</i>	2	Verhältnis der Anzahl von Punkten in L/C und R/C
<i>VerhältnisMittelwert</i>	6	Verhältnis der Mittelwerte der x -, y - und z -Koordinaten von L und C bzw. R und C
<i>DifferenzMittelwert</i>	6	Differenz der Mittelwerte der x -, y - und z -Koordinaten von L und C bzw. R und C
<i>VerhältnisMedian</i>	6	Verhältnis der Mediane der x -, y - und z -Koordinaten von L und C bzw. R und C
<i>DifferenzMedian</i>	6	Differenz der Mediane der x -, y - und z -Koordinaten von L und C bzw. R und C

Tabelle 4.1: Die 73 entwickelten Merkmale

Die Umgebung eines Punktes wird durch die Teilmenge der 3D-Punktwolke beschrieben und charakterisiert, die durch diese drei Boxen definiert ist. Ausgehend von dieser Beschreibung der lokalen Umgebung wurden Trainingsdatensätze manuell mit den Klassen **rechte Laibung** und **keine Laibung** klassifiziert und die 73 in Tabelle 4.1 aufgeführten Merkmale entwickelt.

Zur Bestimmung des am besten geeigneten Merkmals wurden Methoden des maschinellen Lernens, nämlich Entscheidungsbäume (Mitchell, 1997), verwendet. Es wurde der *gain ratio*, also eines der zum Lernen eines Entscheidungsbaums verwendeten Kriterien, betrachtet, um die Signifikanz der Merkmale zu beurteilen.

Merkmals	Achse	BBox	<i>gainratio</i>
<i>DifferenzMedian</i>	y	C,R	1.000
<i>VerhältnisMedian</i>	y	C,R	0.997
<i>VerhältnisMittelwert</i>	y	C,R	0.950
<i>DifferenzMittelwert</i>	y	C,R	0.830
<i>Mittelwert</i>	y	L	0.430

Tabelle 4.2: Die fünf Merkmale mit dem höchsten *gain ratio*

Tabelle 4.2 zeigt die fünf Merkmale mit dem höchsten *gain ratio*, der auf 1 normiert ist. Demnach ist die Differenz der Mediane der BBoxen C und R am besten zur lokalen Beschreibung von Laibungen geeignet.

Wie zu vermuten war, unterscheiden sich Laibungen von ihrer Umgebung (z.B. Fassade) am besten durch die Merkmale, welche auf der *y*-Koordinate beruhen, also den Abstand zur Fassadenebene beschreiben. Die fünf besten Merkmale beziehen sich auf die *y*-Achse. Auch zu vermuten war, dass ein relatives Merkmal, das die *y*-Koordinaten von Laibung (BBox C) und Fassade (BBox R) in Beziehung setzt, besser geeignet ist, als ein absolutes Maß. Dies zeigt sich bei der Betrachtung der *gain ratio* Werte in der letzten Spalte. Die obersten vier *gain ratio* Werte sind relativen Merkmalen zugeordnet und liegen recht nahe beieinander. Vom vierten auf den fünften Wert ist fast eine Halbierung des Wertes festzustellen. Diese geht mit dem Wechsel von einem relativem zu einem absolutem Merkmal einher.

Die *gain ratio* Werte alleine bieten ein absolutes Maß, um einzelne Merkmale miteinander zu vergleichen und diese ihrer Güte nach zu sortieren. Entscheidungsbäume nutzen *gain ratio* als ein *Teilungskriterium* (engl. *split criterion*). Wird anhand der oben beschriebenen Kriterien ein Entscheidungsbaum mit *gain ratio* als Teilungskriterium gelernt, so ergibt sich *DifferenzMedian* als Wurzelknoten. Außerdem wird der Schwellwert von 3,2 cm für dieses Merkmal gelernt, um zwischen **rechte Laibung** und **keine Laibung** zu unterscheiden. Ist dieser Wert kleiner oder gleich 3,2 cm, so handelt es sich bei dem entsprechenden Punkt mit 98,5 %iger Wahrscheinlichkeit nicht um einen Punkt auf der Laibung. Ist der *DifferenzMedian*-Wert größer als 3,2 cm, so liegt der Punkt mit 65 %iger Wahrscheinlichkeit auf der Laibung.

Nach der Wurzel wird einer der beiden folgenden Knoten des Entscheidungsbaum durch das zweitbeste Merkmal aus Tabelle 4.2 gelernt. Bereits mit mit einem Entscheidungsbaum aus drei Knoten steigt die Klassifikationsgüte der Klasse **rechte Laibung** auf 87,8%.

Das SUS-Sampling wird nun derart erweitert, dass die oben genannten Merkmale zusammen mit den beim Lernen des Entscheidungsbaums ermittelten Schwellwerten in die Berechnung der Wahrscheinlichkeit des Samples integriert werden. Dazu wird die bedingte Wahrscheinlichkeit entsprechend der vom Entscheidungsbaum gelernten Merkmale und Schwellwerte angenommen.

4.3.4 Prädiktionsgüte

Der Modellannahme entsprechend werden die beiden Punkte des Samples auf den Fensterlaibungen angenommen. Daher wird eben diese prädiziert. Ähnlich wie die BBox C zur Berechnung der Merkmale in Abbildung 4.10 wird zur Prädiktion eine schmale, relativ flache aber tiefe BBox gewählt. So ist sicher gestellt, dass nur dann viele Punkte durch die BBox selektiert werden, also eine hohe Prädiktionsgüte erhalten wird, wenn ein Teil der Fensterlaibung von der Box umschlossen wird.

Durch die Größe des Samples von zwei Punkten wird auch die Prädiktion durch zwei BBoxen je $10\text{ cm} \times 80\text{ cm} \times 60\text{ cm}$ definiert. Grundsätzlich liegt eine mögliche Fehlerquellen nahe: Es werden nicht Laibungen, sondern andere vertikale, senkrecht zur Fassade stehenden Flächen selektiert wie z.B. Nischen für z.B. Fallrohre. Auch solche Samples haben eine hohe Prädiktionsgüte.

Wegen der Bewertung des Abstandes der beiden Sample-Punkte ist dieser Fehler zwar unwahrscheinlich, jedoch ist beispielsweise eine Nische, deren Breite etwas der Breite eines Fenster entspricht, durch das hier verwendete Modell schwer von einem Fenster mit geschlossenen Rollos oder Rollläden zu unterscheiden. Jedoch werden derartige Fehler durch die Schätzung der bisher unbestimmten Parameter aufgedeckt. Dies wird im folgenden Abschnitt erläutert.

4.3.5 Schätzen unbestimmter Parameter

Zur Bestimmung der oberen und unteren Begrenzung der Fenster, also Fenstersturz und Fensterbank, sowie der Tiefe der Fenster wird der Bereich zwischen linker und rechter Laibung analysiert. Das in Abschnitt 4.3.3 vorgestellte Muster zur Identifikation der Laibungen, nämlich der Median der y -Koordinatenwerte, genauer die Differenz der Mediane, wird hier adaptiert, um aus Sturz und Fensterbank die Höhe eines Fensters zu schätzen.

Basierend auf der Annahme, dass sich die Verteilung der Punkte bezüglich der y -Achse innerhalb eines Fensters und auf der Fassade deutlich unterscheiden, sind gerade die Fensterbank und der Fenstersturz durch eine starke Veränderung des Medians der y -Koordinatenwerte charakterisiert. Zur Bestimmung von Fensterbank und -sturz werden BBoxen symmetrisch zum Schwerpunkt des Fensters, der als Mittelwert der beiden Punkte des Samples angenommen wird, in z -Richtung in der 3D-Punktewolke positioniert. Die Breite der BBoxen wird kleiner als die durchschnittliche Breite eines Fensters gewählt. In Analogie zu Abschnitt 4.3.3 werden die übrigen beiden Längen der BBox so gewählt, dass sich flache und tiefe BBoxen ergeben. Abbildung 4.11 zeigt die BBoxen in hellblau sowie die manuell ermittelten Fenster in dunkelblau.

In orange sind die aus den entsprechenden BBoxen abgeleiteten Mediane der y -Koordinaten gegen die Lage der BBox aufgetragen. Zur Bestimmung von Fensterbank und -sturz genügt die Identifikation der steilsten Gradienten. Ausgehend vom Schwerpunkt des Fensters ist jeweils steilste abfallende Gradient zu wählen.

Entsprechend den Erkenntnissen des vorherigen Abschnitts konnte der Median der y -Koordinaten als geeignetes Muster zur Identifikation der Fensterlaibungen erfolgreich auf

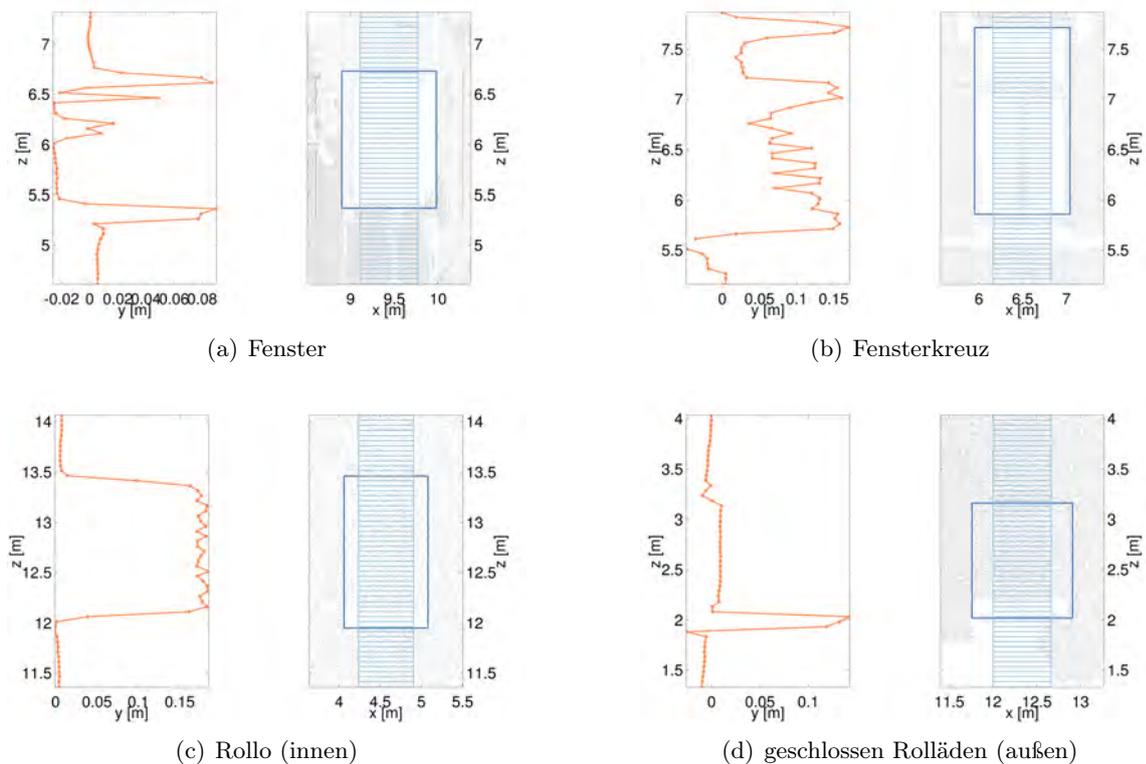


Abbildung 4.11: Schätzen der Höhe Fenstern: Median der selektierten Punkte (jeweils links) und xz -Projektion der Punktwolke (jeweils rechts) mit BBoxen (hellblau) für (a) ein offenes Fenster, (b) ein Fenster mit Fensterkreuz, (c) ein Fenster mit herunter gelassenem Rollo (innen) und (d) ein Fenster mit fast vollständig herunter gelassenen Rolläden (außen)

die Identifikation von Fensterbank und -sturz übertragen werden. Darüber hinaus konnte es auch gegenüber Mittelwert, Minimum und Varianz der y -Koordinaten bestätigt werden.

Abbildung 4.11(c) zeigt ein Fenster, auf dessen Innenseite ein Rollo nahe der Glasfläche heruntergelassen ist. Der eindeutig rekonstruierbare obere und untere Abschluss des Fensters unterscheidet es vom o.g. Fehler 2 (s. S. 76), bei dem beispielsweise Samples mit Punkten auf den Seiten einer Nische gezogen werden, die oben und unten nicht von horizontalen Flächen begrenzt wären.

Abbildung 4.11(d) zeigt, dass selbst der Übergang zwischen Fassade und heruntergelassenen Rolläden eine Signatur in den Kurven hinterlässt. In einer Höhe von ca. 3,1 m verändern sich Median, Mittelwert und Minimum wegen dieses Übergangs. Eine automatische Detektion dieser Stelle ist aber wegen des Signal-Rausch-Verhältnisses bei solch geringen Peaks im Kurvenverlauf schwer. Bei ca. $z = 2[m]$ ist jedoch das kleine, nicht durch die Rolläden verdeckte Stück des Fensters sehr deutlich zu erkennen.

Die Tiefe des Fensters erfolgt durch Betrachtung des Bereichs innerhalb des nun bekannten Fensters ähnlich zu Becker (2009).

Die Lageparameter ergeben sich aus den minimalen Koordinatenwerten der Eckpunkte.

4.3.6 Ergebnisse

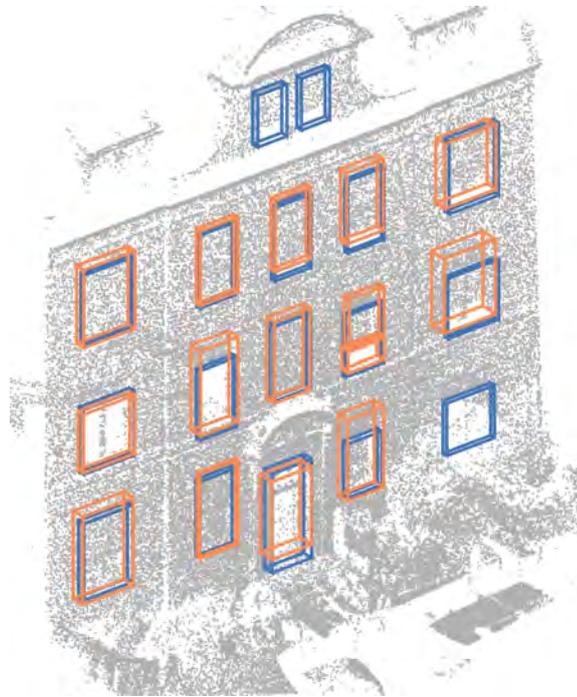


Abbildung 4.12: Automatisch, iterativ rekonstruierte Fenster und Türen (orange) sowie die manuell ermittelten Objekte (blau)

In diesem Abschnitt werden Ergebnisse der oben beschriebenen Schätzung von Fenstern mit MOSAP vorgestellt.

Es wurde die bereits zur Schätzung von Treppen verwendete MATLAB-Implementierung um die oben beschriebenen Modelle, Merkmale und Bewertungsfunktionen erweitert und auf 3D-Punktwolken der Bonner Südstadt angewendet. Auch hier erfolgte die oben diskutierte Trennung von Test- und Trainingsdatensätzen.

Das Verfahren konnte lediglich an neun Datensätzen getestet werden, da das zur Rekonstruktion verwendete Merkmal der Fensterlaibungen voraussetzt, dass diese auch beobachtet wurden. Trotz der Aufnahme der 3D-Punktwolken von mehreren Standpunkten waren die Fensterlaibungen einer Seite in den meisten Datensätzen aufgrund von Verdeckung nicht beobachtet.

Durch das iterative Schätzen einzelner Fenster haben diese individuelle und demnach unterschiedliche Formparameter. Auch wird so eine symmetrische, zeilenartige oder spaltenartige Ausrichtung mehrerer Fenster nicht gewährleistet. Zur Schätzung der Fenster in einem Datensatz wurde die Anwendung des MOSAP-Algorithmus so lange wiederholt, bis keine weiteren

Kriterium	Wert
korrekt rekonstruiert	95
nicht rekonstruiert	13
falsch rekonstruiert	6
durchschnittliche Abweichung in x -Richtung [cm]	1,7
durchschnittliche Abweichung in y -Richtung [cm]	2,0
durchschnittliche Abweichung in z -Richtung [cm]	19,1
durchschnittliche Abweichung der Breite [cm]	5,1
durchschnittliche Abweichung der Tiefe [cm]	9,8
durchschnittliche Abweichung der Höhe [cm]	35,5

Tabelle 4.3: Ergebnisse der Rekonstruktion von Fenstern. Die Genauigkeitsangaben beziehen sich auf richtig und falsch rekonstruierte Fenster.

Fenster gefunden wurden. Dieser Abbruchbedingung liegt die mittlere Prädiktionsgüte der bereits geschätzten Fenster des jeweiligen Datensatzes zugrunde.

Zur Verbesserung der Laufzeit, aber auch, um die Robustheit des Verfahrens zu zeigen, wurde die Rekonstruktion auf einer zufällig gewählten Teilmenge von 100 000 Punkten pro Gebäude durchgeführt. Das entspricht einer durchschnittlichen Punktdichte von 1135 Punkte/m². Tabelle 4.3 stellt die erzielten Ergebnisse und Genauigkeiten zusammen. Die Genauigkeitsangaben beziehen sich auf richtig und falsch rekonstruierte Fenster.



Abbildung 4.13: Beispiel für Fehlerquellen der Rekonstruktion: „doppelte“ (oben links und rechts) und „halbe“ (unten rechts) Fenster: automatisch, iterativ rekonstruierte Fenster (orange) sowie die manuell ermittelten Objekte (blau)

Abbildung 4.13 zeigt beispielhaft die beiden Arten Fehler, die insbesondere zu den hohen Ungenauigkeiten in z -Richtung sowie bezüglich der geschätzten Höhe führen.

In drei Fällen der 13 *nicht rekonstruierten* Fenstern wurden zwei, nahe beieinander liegende,

kleine Fenster als ein großes Fenster rekonstruiert (vgl. Abbildung 4.13 oben rechts und links). Durch diese fehlerhafte Rekonstruktion sind drei Fenstern mit falscher, doppelter Breite und drei Fenster gar nicht rekonstruiert worden. Der Rekonstruktionsfehler schlägt also doppelt zu Buche: Zum Einen werden falsche Breiten für die Fenster geschätzt und zum Anderen werden einige Objekte als nicht rekonstruiert bewertet. Ohne diese drei Fenster, deren Breite falsch geschätzt wurde, wäre die durchschnittliche Abweichung bezüglich der Breite wesentlich geringer.

Die sechs *falsch rekonstruierten* Fenster sind alle darauf zurück zu führen, dass ein Fenster durch zwei geschätzte Fenster rekonstruiert wurde (vgl. Abbildung 4.13 rechts unten). Wegen der falsch geschätzten Höhe des zuerst rekonstruierten Fensters konnte der „Rest“ als weiteres Fenster rekonstruiert werden. Der Grund für diese falsche Höhenschätzung waren zumeist sehr markante Fensterkreuze, die entsprechend als Fensterbank oder -sturz erkannt wurden. Da der Referenzpunkt für Fenster unten, vorne, links angenommen wurde und auch beide Teile, die ein Fenster rekonstruierten, berücksichtigt werden, ergeben sich für den oberen Teil große Abweichungen bezüglich der z -Koordinate. Also wiederum ein doppelter Einfluss der fehlerhaften Rekonstruktion.

Wie Abbildung 4.12 zeigt, können auch Fenster mit geschlossenen Rolläden oder Rollos, die also keine „Löcher“ in der Punktwolke darstellen, zuverlässig geschätzt werden.

4.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde die Rekonstruktion einzelner Fassadenobjekte aus 3D-Punktwolken thematisiert. Es wurde der MOSAP-Algorithmus (Model-Based Sampling and Prediction) vorgestellt sowie seine Verwendung zum Schätzen von Treppen und Fenstern aus 3D-Punktwolken erläutert.

MOSAP liegt das hypothesize-and-verify Konzept zugrunde. Im hypothesize-Schritt werden unter Verwendung des Vorwissens Stichproben gezogen, aus denen dann Modellinstanzen abgeleitet werden. Diese werden im zweiten Schritt bewertet.

Es wird zunächst eine Teilmenge der gegebenen 3D-Punktwolke aufgrund der Lagewahrscheinlichkeit $P(\mathbf{x})$ der einzelnen Punkte bestimmt. In Abhängigkeit der Klasse k des zu rekonstruierenden Objekts ergibt sich die Lagewahrscheinlichkeit eines Punktes aus dem Produkt der Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Koordinatenwerte:

$$P(\mathbf{x} | k) = P_x(x_1 | k) P_y(x_2 | k) P_z(x_3 | k)$$

Aus der so bestimmten Menge wird dann eine kleinere Menge an Stichproben unter Berücksichtigung der Wahrscheinlichkeit der Koordinatendifferenzen gezogen. Aufgrund der verwendeten Modelle sowie der Orientierung der 3D-Punktwolken entsprechen die Koordinatendifferenzen nämlich den Formparametern der Objekte, für die Wahrscheinlichkeitsdichten geschätzt wurden. Analog zur Lagewahrscheinlichkeit eines Punktes ergibt sich die Wahrscheinlichkeit eines Samples aus zwei Punkten $P(\mathbf{x}^1, \mathbf{x}^2)$ zu

$$P(\mathbf{x}^1, \mathbf{x}^2 | k) = P_{\Delta x}(\Delta x_1 | k) P_{\Delta y}(\Delta x_2 | k) P_{\Delta z}(\Delta x_3 | k).$$

Durch dieses vorwissenbasierte Sampling ist die Wahl von Stichproben, die ausschließlich Inlier enthalten, effizient. Beide Sampling-Schritte wurden durch SUS (Stochastic Universal Sampling) realisiert. Somit ist das Sampling nicht nur effizient, sondern auch robust.

Da ein Sample das Modell hinreichend genau spezifiziert, wurde zur Modellbewertung die Prädiktionsgüte eingeführt, die als die Teilmenge einer 3D-Punktwolke definiert ist, die auf der geschätzten Oberfläche des Objekts liegt. Wegen der Modellierung durch planare Maschen bzw. Ebenen entspricht die Prädiktion eben einer Anfrage einer räumlichen Datenstruktur wie einem kd-Baum und ist somit sehr effizient und unabhängig von der Größe des Objekts. Die übliche Abstandsberechnung des Modells zu allen Punkten der 3D-Punktwolke entfällt.

Bedingt durch die Verwendung sehr einfacher geometrischer Modelle müssen nach der Bestimmung der Modellinstanz mit der größten Prädiktionsgüte weitere Parameter geschätzt werden. Wegen der bereits geschätzten Parameter sowie Orientierung der 3D-Punktwolken reduziert sich dies jedoch auf die lokale Analyse der Punktdichte oder -verteilung entlang der Koordinatenachsen.

Das Verfahren wurde am Beispiel von Treppen und Fenstern erläutert und durch Ergebnisse empirischer Untersuchungen bestätigt.

Im Folgenden wird das in Abschnitt 3.2 vorgestellte semantische Modell in eine attributierte Grammatik überführt. Es wird gezeigt, dass viele Symbole, insbesondere die Terminale, wegen ihrer geringen Anzahl von Parametern durch MOSAP geschätzt werden können.

5 Attributierte Grammatik zur Modellierung von Fassaden

Bisher fehlt es an einem Formalismus, mit dem sich die bereits vorgestellten Modelle der Semantik, Geometrie sowie quantifiziertes Vorwissen in einem Modell kombinieren und in den Rekonstruktionsprozess integrieren lassen. In diesem Kapitel wird ein auf attributierten Grammatiken basierendes Modell vorgestellt, das diese Anforderungen erfüllt. Aufgrund der Generizität der Grammatiken ist es möglich, aus einem solchen Modell Instanzen mit einer vorab unbekanntem Anzahl von Parametern abzuleiten. Das macht diese Modelle für den Einsatz in Rekonstruktionsverfahren interessant und wird in Kapitel 6 diskutiert.

Modellbasierte Rekonstruktion bringt Vorwissen über die zu rekonstruierenden Objekte in den Schätzprozess ein. In Kapitel 3 wurde das hier relevante Wissen über Fassaden und deren Bestandteil bereits ausführlich behandelt. Im vorherigen Kapitel 4 wurden Ansätze gezeigt, die Vorwissen, das durch Wahrscheinlichkeiten modelliert wird, in den Rekonstruktionsprozess einfacher Objekte, die durch wenige Parameter beschrieben werden, integrieren.

Jedoch ist die Repräsentation des Vorwissens bisher losgelöst vom Formalismus mit dem die Semantik des Modells, die Beziehung zwischen einzelnen Objekten, beschrieben werden. Häufig werden solche Ontologien in Form von UML-Klassendiagrammen repräsentiert, jedoch können dann Bedingungen wie Schwellwerte nur durch Hinzunahme weiterer Formalismen wie der Object Constraint Language (OCL, Object Management Group (2006)) modelliert werden (vgl. Schmittwilken et al., 2007). Die Integration komplexeren Vorwissens wie Wahrscheinlichkeitsdichten ist mit solchen Sprachen nur schwer möglich.

Die kurze Einführung in formale Grammatiken in Abschnitt 2.2.5 zeigte bereits, dass sich mit Grammatiken generische Modelle definieren lassen. Gerade diese Generizität ist im Rekonstruktionsprozess von großem Vorteil, da so beispielsweise auch Modelle mit einer vorab unbekanntem Anzahl von Parameter geschätzt werden können. Im Gegensatz zu parametrischen Schätzverfahren wie der Methode der kleinsten Quadrate oder etwa RANSAC oder MLESAC ist hier das Modell, oder im Vokabular formaler Grammatiken zu bleiben, der Ableitungsbaum, der das zu rekonstruierende Objekt beschreibt, vorab nicht notwendigerweise bekannt. Stattdessen wird die allgemeinere Definition, nämlich die Grammatik verwendet.

Durch die Verwendung attributierter Grammatiken ist die Vererbung von Attributen zwischen Symbolen möglich. Die Modellierung oder gar die Bedingung der Identität bestimmter Formparameter einzelner Objekte erlaubt es, Ergebnisse der Rekonstruktion von Teilobjekten in die Schätzung weiterer Objekte einfließen zu lassen.

In Abschnitt 5.2 wird daher die *Fassadengrammatik* vorgestellt, die aus dem semantischen Modell abgeleitet wird. Weiterhin wird dort erläutert, wie die Geometrie und quantifiziertes

Vorwissen von Objekte in diese Grammatiken integriert werden. Um solche Attributgrammatiken in ein Rekonstruktionsverfahren zu integrieren, sind einige konzeptionelle Modifikationen des Formalismus notwendig, die insbesondere die Verwendung von semantischen Regeln und das Propagieren von Attributen betreffen. So werden in Abschnitt 5.1 *Guards* als besondere semantische Regeln eingeführt, die eine Bewertung der Ausführbarkeit von Produktionsregeln ermöglichen. Außerdem wird *Unifikation* zur Wertzuweisung von Attributen eingeführt, die durch Rekonstruktion geschätzt wurden und so für den weiteren Rekonstruktionsprozess verfügbar gemacht werden. Abschließend wird in Abschnitt 5.3 das synthetische Generieren von Fassaden thematisiert und in Abschnitt 5.4 das Kapitel zusammengefasst.

5.1 Adaption attributierter Grammatiken

Im Rahmen eines Rekonstruktionsprozesses ist die Verwendung von Grammatiken gerade wegen deren Generizität interessant. Hierzu ist es aber notwendig, die Interaktion beider Konzepte zu untersuchen und eine Schnittstelle festzulegen.

Im Folgenden wird der Formalismus attributierter Grammatiken so erweitert, dass die Steuerung eines Rekonstruktionsprozesses sowie die Integration von Ergebnissen der Rekonstruktion in die Grammatik möglich sind. In Abschnitten 5.1.1 und 5.1.2 werden Konzepte vorgestellt, die eine bedingte und datengetriebene Auswahl von Produktionsregeln ermöglichen. Das in Abschnitt 5.1.3 vorgestellte Konzept der Unifikation ermöglicht die Rückführung von Ergebnissen der Rekonstruktion, wie etwa geschätzten Form- und Lageparametern, in die Grammatik.

5.1.1 Semantische Regeln als Constraints

Attributierter Grammatiken sind gerade wegen der vielfältigen Verwendbarkeit der semantischen Regeln für die Definition von Modellen im Rekonstruktionsprozess geeignet. Sah deren Definition in in Abschnitt 2.2.5 (S. 26) zunächst nur eine Wertzuweisung oder Spezifikation funktionaler Zusammenhänge vor, so wird das Konzept der semantische Regeln hier derart erweitert, dass auch die Definition von Ungleichungen möglich ist. Diese stellen dann Bedingungen (Constraints) dar, die einzelne Attribute erfüllen müssen.

```

R = { ...
  R6(P17) Treppe1.anzahlStufen < 19
  R7(P17) 0,13 ≤ steigung1.steigung ≤ 0,21
  R8(P17) -0,4363 ≤ Treppe.normale · steigung.normale ≤ 0,4363
  ...
}

```

Listing 5.1: Weitere semantisch Regeln der Fassadengrammatik G_F aus Listing 2.4

Listing 5.1 zeigt drei solcher semantischer Regeln als Erweiterung der Fassadengrammatik aus Listing 2.4. Die Regel $R_6(P_{17})$ setzt die DIN 18065 (Deutsches Institut für Normung e.V.,

2000) um, die vorgibt, dass Treppen(läufe) aus maximal 18 Stufen bestehen dürfen. Die zweite Regel beschränkt die Steigungen einer Treppe auf den Wertebereich von 0,13 cm bis 0,21 cm was sich aus dem Vorwissen über Treppen ergibt (vgl. Abschnitt 3.4.1). Ähnlich lässt Regel $R_8(P_{17})$ nur eine Winkeldifferenz von 0,4363 rad (ca. 5°) für die Attribute *Treppe.normale* und *steigung.normale* zu.

Solche Bedingungen werden dazu verwendet, die Ausführung einer Produktionsregel zu steuern. Dabei ist zu spezifizieren, ob die gegebene Bedingung *vor* oder *nach* dem Ausführen der Produktionsregel und aller funktionalen semantischen Regeln erfüllt sein muss (s.g. *pre constraints* und *post constraint*). Durch eine derartige Verwendung semantischer Regeln wird der Ableitungsprozess sehr differenziert steuerbar. Anders als bei probabilistischen Grammatiken, deren Produktionsregeln ein Wahrscheinlichkeitswert zugewiesen ist, wird die Ausführbarkeit einer Regel hier auf Ebene der Attribute gesteuert.

5.1.2 Guards

Wie im vorherigen Abschnitt gezeigt, können semantische Regeln als Constraints für die Ausführung von Produktionsregeln verwendet werden. Im Folgenden wird die Bedingung von Produktionsregeln durch spezielle semantische Regeln, die als *Guards* bezeichnet werden, vertieft.

Bedingte Anweisungen, die nur dann ausgeführt werden, wenn eine Bedingung erfüllt ist, sind ein wichtiges Konzept der meisten Programmiersprachen. Konzepte zur Überwachung der Einhaltung dieser Bedingungen werden als *Guards* bezeichnet. Insbesondere in der logischen Programmierung werden Guards (guarded horn clauses, Ueda, 1986) verwendet, um eine aus mehreren Klauseln auszuwählen.

Entsprechend werden Guards hier als *datenbasierte Operatoren* zur Bewertung von Produktionsregeln eingeführt. Guards stellen eine besondere Art semantischer Regeln dar, die nicht der Wertzuweisung von Attributen dienen, sondern unter Berücksichtigung der Daten über die Ausführung von Produktionsregeln „wachen“. Unter *Daten* werden hier alle verfügbaren Informationen zusammengefasst: Das quantifizierte Vorwissen in Form von Wahrscheinlichkeitsdichten, die 3D-Punktwolke sowie Teilmengen, die aufgrund bereits geschätzter Teilobjekte definiert sind, und Parameter der bereits rekonstruierten Teilobjekte, die unifiziert wurden.

Da Guards besondere semantische Regeln darstellen, ist jeweils ein Guard einer Produktionsregel zugeordnet. Zur Bewertung einer Produktionsregel r schätzt der Guard ihre Wahrscheinlichkeit $P(r)$ unter Berücksichtigung der zu interpretierenden Daten d . Nach dem Bayestheorem folgt

$$P(r | d) = \frac{P(d|r) P(r)}{P(d)}.$$

Dabei ist der Prior $P(r)$ durch die aus quantifiziertem Vorwissen geschätzten Dichten (vgl. Abschnitt 3.4.1, S. 51) bestimmt und $P(d)$ lediglich ein normierender Faktor. Somit reduziert sich die oben beschriebene datennahe Bestimmung der Wahrscheinlichkeit eines Guards auf die Betrachtung des Likelihood-Terms

$$P(d|r).$$

Es gilt für alle Regeln r_i mit identischem Linkeseitesymbol

$$\sum_i P(r_i) = 1 \quad , \quad \sum_i P(r_i | d) = 1.$$

Guards sollen schnell und robust eine Analyse der Punktwolke liefern, die auf die Anwendbarkeit der Produktionsregel schließen lässt. Sie sollen die für die Produktionsregel relevanten Muster identifizieren. In Abschnitt 6.2 wird gezeigt wie beispielsweise Kerndichteschätzer zu ihrer Ermittlung verwendet werden können, indem sie auf die achsparallele Projektion einer 3D-Punktwolke angewendet werden.

5.1.3 Unifikation

Zur Adaption attributierter Grammatiken für die Rekonstruktion bedarf es auch der Modifikation der Attributpropagierung bei der Ableitung. Gerade die explizite Repräsentation der Identität von Attributen unterschiedlicher Symbole führt zu einer Reduktion der Anzahl von Parametern. Im Grundlagenkapitel wurde dies beispielhaft an der Vererbung der Normalenrichtung von Fassade und Treppenstufe erläutert (vgl. Listing 2.4, S. 27). Zur Modellierung solcher Identitäten wurden bisher semantische Regeln verwendet, die dies über die Wertzuweisung realisierten. Im Folgenden wird hierzu das Konzept der *Unifikation* eingeführt.

Knuth (1968) führt Vererbung und Synthetisierung ein (vgl. Abschnitt 2.2.5, S. 26) und erlaubt somit die bidirektionale Wertzuweisung in semantische Regeln. Die Attribute der linken und rechten Seite des Gleichheitszeichens einer semantischen Regel können den Wert vom Attribut der jeweils anderen Seite zugewiesen bekommen. Abhängig davon, welches der Attribute unbekannt ist, wird dies eben als Vererbung oder Synthetisierung von Attributen bezeichnet.

Wird ein bisher unbelegtes Attribut einem Blatt **a** des Ableitungsbaums zugewiesen, so kann es über Synthetisierung an dessen Vorgänger propagiert werden. Existiert weiterhin ein Blatt **b** und läuft der Pfad von **a** nach **b** über die Wurzel des Ableitungsbaums, so muss der Attributwert, um bis zu **b** propagiert zu werden, zunächst zur Wurzel synthetisiert und dann zu **b** vererbt werden.

Um dieses iterative Propagieren von Attributen durch den gesamten Ableitungsbaum zu vermeiden, wird das Konzept der *Unifikation* (Apt, 2006) aus dem Bereich der logischen Programmierung übernommen, wo es zur Herbeiführung der Identität von Prädikaten oder Termen durch Substitution verwendet wird. Durch Unifikation gleichnamiger Attribute werden bei der Bestimmung eines dieser Attribute alle übrigen mit demselben Wert belegt, ohne dass entsprechende Pfade im Ableitungsbaum durchlaufen werden müssen.

Die Unifikation von Attributen bringt ebenfalls den Vorteil, dass die Definition vieler Attribute und semantischer Regeln entfallen kann. Bei der Verwendung von Vererbung und Synthetisierung müssen diese nämlich zur Definition des zur Propagierung verwendeten Pfades im Ableitungsbaum spezifiziert werden. In Listing 2.4 (S. 27) sind beispielsweise die Regeln in den Zeilen 13 – 15 ausschließlich zur Propagierung des Attributs *normale* notwendig.

Die Identität bestimmter Attribute wird im Folgenden explizit als semantische Regel angegeben, die aber eben nicht auf Attribute der Symbole der linken oder rechten Seite der Produktionsregel beschränkt sind. Die semantischen Regeln der Zeilen 13–15 würden entsprechend durch die Regel `steigung.normale = Fassade.normale` ersetzt.

5.2 Die Fassadengrammatik

In diesem Abschnitt wird erläutert, wie das in Abschnitt 3.2 (S. 44) vorgestellte semantische Modell in eine Attributgrammatik überführt wird (vgl. Abschnitt 5.2.1), die auch das entsprechende Vorwissen in Form von Häufigkeitsverteilungen und Wahrscheinlichkeiten (vgl. Abschnitt 5.2.3, S. 91) sowie die Geometrie der Objekte (vgl. Abschnitt 5.2.2, S. 89) repräsentiert.

Ähnlich der abstrakten Modellierung mit UML-Klassendiagrammen (Object Management Group, 2007) werden auch bei der Modellierung mit Attributgrammatiken Objekte durch Symbole repräsentiert. In Analogie zu den Klassen werden die Objekteigenschaften auch hier durch Attribute modelliert. Insbesondere die geometrische Gestalt der Objekte wird in Attributen für Lage- und Formparameter spezifiziert.

5.2.1 Abbildung des semantischen Modells

Im Folgenden wird die Abbildung des in Abbildung 3.1 (S. 46) gezeigten UML-Klassendiagramms auf die Produktionsregeln der *Fassadengrammatik* erläutert. Hierbei stehen insbesondere die Modellierung der Generalisierung, Spezialisierung, Aggregation sowie Assoziation im Vordergrund. Bereits von Schmittwilken et al. (2007) wurde die Abbildung von UML-Klassendiagrammen auf kontextfreie Grammatiken erläutert. Die dort gezeigten Ansätze werden hier aufgegriffen und erweitert.

Abbildung 5.1 zeigt den hier relevanten Teil des UML-Diagramms von S. 46. Es wurden in rot die Nummern der Produktionsregeln ergänzt, die aus der entsprechenden Relation abgeleitet wurden und im Folgenden diskutiert werden. Listing 5.2 zeigt die entsprechenden Produktionsregeln der Fassadengrammatik, die zum Teil schon in vorherigen Kapiteln verwendet wurden.

Die Struktur eines Ableitungsbaum legt nahe, das Symbol mit der allgemeinsten Bedeutung in der Wurzel zu repräsentieren und zu den Blättern hin spezieller zu werden. Dies entspricht dem geodätischen Prinzip *vom Großen ins Kleine*. Wegen der Verwendung kontextfreier Grammatiken haben alle Produktionsregeln nur ein Symbol auf der linken Seite. Das Linkeseitsymbol repräsentiert aufgrund der Struktur des Ableitungsbaum das generalisierte Objekt oder das Aggregat. Wegen der im UML-Diagramm angegebenen Multiplizitäten kann anhand der Anzahl der Symbole der linken Seite nicht auf den Typ der Relation geschlossen werden.

Die im Folgenden verwendeten Nummern der Produktionsregeln beziehen sich auf die Zeilennummer in Listing 5.2.

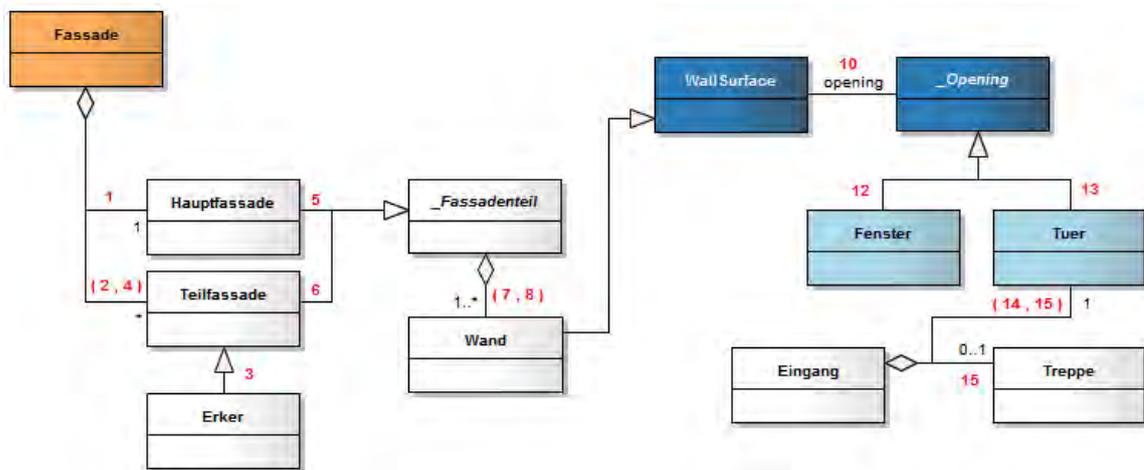


Abbildung 5.1: Relevanter Teil des UML-Diagramms aus Abbildung 3.1 (S. 46). Die roten Nummern an den Relationen entsprechen den Nummern der abgeleiteten Produktionsregel.

-
- 1 Fassade → Hauptfassade
 - 2 Fassade → Hauptfassade Teilfassade
 - 3 Teilfassade → Erker
 - 4 Teilfassade → Erker Teilfassade
 - 5 Hauptfassade → _Fassadenteil
 - 6 Erker → _Fassadenteil _Fassadenteil _Fassadenteil wand wand
 - 7 _Fassadenteil → Wand
 - 8 _Fassadenteil → Wand _Fassadenteil
 - 9 Wand → wand
 - 10 Wand → wand Fensterraster
 - 11 Fensterraster → fensterraster
 - 12 Fensterraster → fenster
 - 13 Fensterraster → fensterraster Eingang
 - 14 Eingang → tuer
 - 15 Eingang → tuer treppe
-

Listing 5.2: Produktionsregeln der Grammatik zur Rekonstruktion von Fassaden durch Parsing

Zunächst wird die Aggregation der Klasse **Fassade** aus **Hauptfassade** und **Teilfassade** auf die Produktionsregeln P_1 und P_2 abgebildet. Jedoch lässt sich die Aggregation wegen der unterschiedlichen Multiplizitäten nicht auf eine Regel abbilden. Schließlich gibt es immer eine **Hauptfassade** aber nicht zwingend auch eine **Teilfassade**.

Die Spezialisierung der Klasse **Teilfassade** zu **Erker** wird durch die Regeln P_3 und P_4 ausgedrückt. Letztere ist rekursiv und wiederum der Multiplizität von **Teilfassade** in Bezug auf **Fassade** geschuldet.

Die abstrakte Oberklasse **_Fassadenteil** wurde zur Kapselung der Aggregation von Wänden

eingeführt. Die entsprechende Spezialisierung von `_Fassadenteil` zu `Hauptfassade` und `Teilfassade` wird auf die Regeln P_5 und P_6 abgebildet. Da `Erker` eine Unterklasse von `Teilfassade` ist, wird in P_6 `Erker` als Symbol der linken Seite verwendet. Die Regel P_6 beschreibt einen Erker als aus drei Seitenwänden `_Fassadenteil`, die auch Fenster oder Eingänge enthalten können, sowie einem oberen und einem unteren Begrenzung (`wand`) bestehend.

Auch die Aggregationsbeziehung zwischen `_Fassadenteil` und `Wand` wird wegen der Multiplizität auf die nichtrekursive Regel P_7 und die rekursive Regel P_8 abgebildet. Regel P_9 die lediglich der Terminierung des Symbols `Wand`.

Da die Klasse `Wand` Unterklasse von `WallSurface` ist und `Fenster` sowie `Tuer` Unterklassen von `_Opening`, erben die Unterklassen die Relation `opening` zwischen den Oberklassen. Dies wird durch Regel P_{10} ausgedrückt, die das allgemeines Symbol `Fensterraster` für eine beliebige Menge von Öffnungen, die auch Türen sein können, einführt. Regeln P_{11} und P_{12} terminieren das Symbol zu einer Gruppe von Fenstern oder einem einzelnen Fenster. Dass eine der durch Fensterraster repräsentierten Öffnungen eine Tür sein kann wird durch Regel P_{13} ausgedrückt. Da eine Tür stets Teil eines Eingangs ist, muss P_{13} im Kontext der Regeln P_{14} und P_{15} verstanden werden.

In der Fassadengrammatik ist `treppe` als Terminalsymbol modelliert, da es z.B. durch das in Abschnitt 4.2 vorgestellten Verfahren geschätzt werden kann. Grundsätzlich sind alle Terminale durch wenige Parameter bestimmt und lassen sich durch robuste Schätzer wie MOSAP (vgl. Kapitel 4, S. 59) rekonstruieren. Auch die meisten Nichtterminale lassen sich durch einfache geometrische Modelle wie planare Flächen oder Quader approximieren und somit durch MOSAP schätzen.

5.2.2 Repräsentation von Geometrie

Die Modellierung von Fassaden mit attributierten Grammatiken setzt insbesondere die Modellierung ihrer Geometrie voraus. Wie von Schmittwilken et al. (2009a) am Beispiel von Treppen vorgestellt, werden die Attribute zur Beschreibung von parametrisierten Geometrien verwendet und die semantischen Regeln zur Propagierung von Parametern. Auch Symmetrien und die korrekte Topologie der Modelle lässt sich mit Grammatiken sicherstellen.

Beim Vergleich des Ableitungsbaums in Abbildung 2.8 (S. 28) und der beispielhaften Darstellung der verwendeten Begriffe in Abbildung 3.2 (S. 48) wird deutlich, dass alle Knoten des Ableitungsbaums Entsprechungen zu räumlichen Objekten oder Bereichen haben – auch die inneren Knoten (Nichtterminale), also die die aggregierten und generalisierten Objekte.

Die Blattknoten (Terminalsymbole) beschreiben jeweils ein konkretes Realweltobjekt, dessen (sichtbare) Oberfläche hier hier durch B-Rep modelliert wird (vgl. Abschnitt 3.3). Jedem Terminal wird eine parametrisierte geometrische Beschreibung durch eine Menge von planaren Maschen, meistens Rechtecke, zugewiesen. Die Lage- und Formparameter dieser Maschen werden durch die Attribute des jeweiligen Symbols beschreiben. Für Rechtecke sind dies deren Breite und Höhe sowie ein Referenzpunkt und die Orientierung, die durch die Normalenrichtung repräsentiert wird. Da die meisten Objekte als achsparallel angenommen werden

```

P17: Treppe → steigung auftritt Treppe1

R08(P17): steigung.pkt = Treppe.pkt
R09(P17): steigung.breite = Treppe.breite
R10(P17): steigung.steigung = Treppe.steigung

R11(P17): auftritt.pkt = trans(Treppe.pkt, 0,0,Treppe.steigung,
                                0,0,Treppe.normale · steigung.normale)
R12(P17): auftritt.breite = Treppe.breite
R13(P17): auftritt.tiefe = Treppe.auftrittsTiefe

R14(P17): Treppe1.pkt = trans(auftritt.pkt, 0,Treppe.auftrittsTiefe,0,
                                0,0,Treppe.normale · steigung.normale)
    
```

Listing 5.3: Semantische Regeln zur Modellierung der Geometrie einer Treppe

(vgl. Abschnitt 2.1.1 und 3.1), genügt zur Definition eines Rechtecks dessen Referenzpunkt sowie die Ausdehnung in zwei Achsrichtungen.

Listing 5.3 zeigt beispielhaft die semantischen Regeln der Treppengrammatik.. Die rekursive Produktionsregel modelliert die Aggregation von Treppen aus Stufen (Steigung und Auftritt). Die semantischen Regeln definieren die Geometrie der Treppenoberfläche durch die Parameter horizontaler und vertikaler Rechtecke, die Steigungen (Zeilen 4 bis 6) und Auftritte (Zeilen 8 bis 12) beschreiben. Abbildung 5.2 illustriert dies.

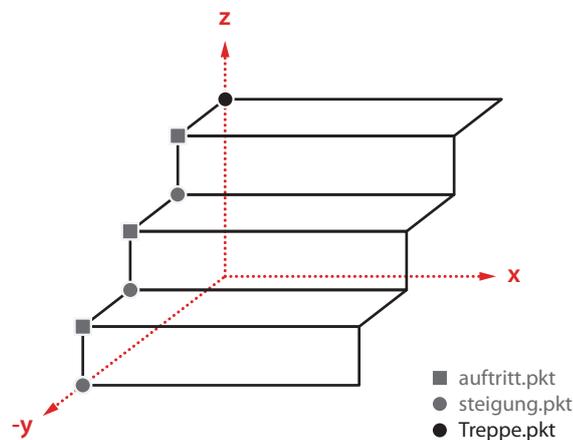


Abbildung 5.2: Lage- und Formparameter der Treppe: Berechnung des Referenzpunktes

Der in den semantischen Regeln verwendeten Funktion

$$r' = trans(r, \Delta x, \Delta y, \Delta z, 0, 0, \phi_z)$$

liegt die Definition der Transformation

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi_z & -\sin \phi_z & 0 & \Delta x \\ \sin \phi_z & \cos \phi_z & 0 & \Delta y \\ 0 & 0 & 1 & \Delta z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}$$

unter Verwendung homogener Koordinaten (Hartley und Zisserman, 2006) zugrunde, die eben eine beliebige Translation und einer Rotation um die z -Achse beschreibt.

Da jeder Blattknoten einen wohl definierten Teil der Objektoberfläche beschreibt, wird die Geometrie eines inneren Knotens K durch die Vereinigungsmenge der Geometrien aller Blätter des Teilbaums definiert, dessen Wurzel K ist. Approximativ wird der kleinste umschließende Quader (Minimum Bounding Box, MBB) gewählt.

Da so die geometrische Entsprechung jedes Symbols durch dessen Attribute festgelegt wird, ist es naheliegend, dass die Reihenfolge der Symbole im Ableitungsbaum für die geometrische Interpretation ohne Bedeutung ist. Zwei im abgeleiteten Wort benachbarte Symbole müssen somit nicht auch in der geometrischen Interpretation benachbart sein. Das abgeleitete Wort verliert hier im Gegensatz zu Grammatiken natürlicher Sprachen, wo es einen Satz der jeweiligen Sprache definiert, ebenfalls an Bedeutung.

Die Interaktion der geometrischen Objekte ist implizit durch die einzelnen Symbole des Ableitungsbaums und deren Geometrie gegeben. Beispielsweise definieren Fenster Löcher in der Wand. Die Zuordnung ergibt sich aus den gemeinsamen Vorgängerknoten im Ableitungsbaum.

5.2.3 Integration des quantifizierten Vorwissens

Die Repräsentation des in Abschnitt 3.4.1 (S. 51 ff.) präsentierten Vorwissens erfolgt unmittelbar in den Attributen. Falls entsprechende Häufigkeitsverteilungen existieren, werden jedem Symbol S , das mindestens ein Attribut a_i zur Modellierung eines Form- oder Lageparameters des repräsentierten Objekts besitzt, je a_i die folgenden Attribute hinzugefügt:

- a_{i_min} und a_{i_max} als Skalare der minimalen und maximalen Attributwerte
- a_{i_c} und a_{i_v} als Vektoren der Klassenmächtigkeit (c) und der Klassengrenzen (v) der Häufigkeitsverteilungen
- a_{i_k} als Vektor der Stützstellen der geschätzten Dichte – soweit diese aus den Häufigkeitsverteilungen abgeleitet werden konnten

Gerade durch diese Integration des quantifizierten Vorwissens in das Modell unterscheidet sich das im nächsten Kapitel 6 vorgestellte Rekonstruktionsverfahren von den in Kapitel 4 gezeigten Verfahren, in denen nur Teile des Modellwissen in die Schätzer integriert wurden.

5.3 Synthetisches Generieren von Fassaden

Im vorangegangenen Abschnitt wurde die generische Modellierung von Fassaden mit attributierten Grammatiken eingeführt, um die semantische und geometrische Beschreibung von Objekten zu kombinieren und zugleich weiteres Vorwissen wie Häufigkeitsverteilungen im gleichen Modell zu kodieren. Neben der Verwendung der Grammatik im Rekonstruktionsprozess kann das Modell verwendet werden, um synthetische Modellinstanzen zu generieren. Gemeint ist also das Ableiten der Grammatik (Erstellen eines Ableitungsbaums) ohne die Auswahl von Regeln oder die Belegung von Attributwerten an die Interpretation von Beobachtungsdaten zu binden.

Sämtliche notwendigen Entscheidungen werden zufällig gleichverteilt oder unter Berücksichtigung der in den Attributen kodierten Wahrscheinlichkeiten getroffen. Letzteres garantiert, dass die Formparameter trotz der randomisierten Ableitung den empirisch ermittelten Verteilungen entsprechen.

Krückhans und Schmittwilken (2009) und Plümer et al. (2009) zeigen, dass attributierte Grammatiken wie die im vorherigen Abschnitt 5.2 beschriebenen zum synthetischen Generieren von Gebäudefassaden genutzt werden können (vgl. Abbildung 5.3). Anwendung findet das Verfahren beispielsweise bei 3D-Stadtmodellen niedriger Auflösung, die so automatisch einem bestimmten Baustil entsprechend verfeinert werden.

Zur grafischen Darstellung eines Ableitungsbaums werden beim synthetischen Generieren alle Terminalsymbole geometrisch interpretiert. Um die Generizität der Grammatik nicht einzuschränken, wird auf die Verwendung prototypischer Objekte verzichtet und es müssen bei hohem Detaillierungsgrad des Modells sehr kleine Objektteile durch Grammatiksymbole und deren Attribute repräsentiert werden. Daher sind auch die verwendeten Grammatiken umfangreicher und detaillierter, als die Fassadengrammatik aus Listing 5.2 (S. 88).

Die Grammatik, die Abbildung 5.3 zugrunde liegt (Krückhans, 2008; Krückhans und Schmittwilken, 2009), beschreibt beispielsweise auch die Balkongitter oder Geländer von Treppen durch eigene Symbole. Die Abbildung entstand durch randomisiertes Anwenden der Grammatik unter Berücksichtigung des Gebäudegrundrisses sowie der Gebäudehöhe.



Abbildung 5.3: Synthetisch generierter Straßenzug

Zur Definition geometrischer Attributgrammatiken und zu deren Verarbeitung wurde das in Java (Oracle, 2011) programmierte Framework XG^{EP} (XML based Grammar Editing and Processing) (Schmittwilken et al., 2009a; Behmann et al., 2010) entwickelt. Es bietet die Möglichkeit, attributierte Grammatiken zu definieren und zu prozessieren sowie visualisierbare Formate wie X3D aus Ableitungsbaumen zu erzeugen. Wegen der offenen Schnittstellen

kann vielfältig in die Steuerung des Ableitungsprozesses eingegriffen werden. XG^{ep} ist unter <http://www.ikg.uni-bonn.de/forschung/xgep.html> frei verfügbar und wird in Anhang E kurz vorgestellt.

5.4 Zusammenfassung

Dieses Kapitel stellte die Verwendung attributierter Grammatiken zur Modellierung geometrischer Objekte vor. Besonderer Fokus wurde auf die Repräsentation von Aggregation und Generalisierung durch Produktionsregeln sowie die besondere Verwendung der Attribute zur Spezifikation von Geometrie und quantifiziertem Vorwissen gelegt. Das bereits in Abschnitt 3.2 vorgestellte semantische und geometrische Modell von Fassaden wurde exemplarisch auf die *Fassadengrammatik* abgebildet.

Mit der vorgestellten Fassadengrammatik steht nun ein Modell zur Verfügung, das sich besonders zur Integration in ein modellbasiertes Rekonstruktionsverfahren eignet, da es sämtliches zur Verfügung stehendes Vorwissen über die zu rekonstruierenden Objekte enthält. Gerade die Anwendung des synthetischen Generierens von Fassaden zeigt die Generizität dieses Modells, die für eine top-down Rekonstruktion vorteilhaft ist. So lassen sich Modelle generieren, deren Parameteranzahl vorab unbekannt ist.

Darüber hinaus wurde der Formalismus attributierter Grammatiken in diesem Kapitel modifiziert, um deren Verwendbarkeit in einem Rekonstruktionsprozess zu verbessern. So wurde das Konzept der Guards eingeführt sowie die Vererbung und Synthetisierung von Attributwerten durch Unifikation verallgemeinert.

Guards sind spezielle semantische Regeln und somit jeweils einer Produktionsregel zugeordnet. Ein Guard wird hier als eine Bewertungsfunktion verstanden, der auf Basis der Messdaten, aus denen die Objekte rekonstruiert werden sollen, die Wahrscheinlichkeit einer Produktionsregel schätzt. Um bei der Ableitung einer Grammatik zwischen alternativen Produktionsregeln entscheiden zu können, wird die von den Guards ermittelte Wahrscheinlichkeit betrachtet. Dies wird im nächsten Kapitel 6 ausführlich erläutert.

Die Einführung der Unifikation zur Wertzuweisung von Attributwerten bereitet ebenfalls die Verwendung von attributierten Grammatiken im Rekonstruktionsprozess vor. Durch dieses Konzept wird die Modellierung der Identität von Form- und Lageparametern gestützt und deren Schätzung „außerhalb“ der Grammatik vereinfacht.

Im Folgenden wird das Konzept des Parsings aufgegriffen, um aus 3D-Punktwolken unter Verwendung der in diesem Kapitel vorgestellte Fassadengrammatik sowie der in Kapitel 4 präsentierten Rekonstruktionsverfahren den Ableitungsbaum zu identifizieren, der die beobachtete Fassade bestmöglich beschreibt.

6 Identifikation und Rekonstruktion aggregierter Strukturen in Fassaden

Im vorherigen Kapitel wurden attributierte Grammatiken zur Modellierung von geometrischen Objekten wie Gebäuden und Gebäudeteilen vorgestellt. Insbesondere die ihnen eigene Generizität ist ein großer Vorteil bei der Repräsentation der Diversität urbaner Räume. Diese Vielfalt möglicher Modellinstanzen scheint sich zunächst jedoch als Nachteil zu erweisen, wenn aus allen möglichen Modellinstanzen die beste Hypothese gewählt werden soll.

Im nun folgenden Kapitel wird daher ein *Parsingalgorithmus* vorgestellt, der den besten zu einer gegebenen 3D-Punktwolke passenden Ableitungsbaum identifiziert. Dazu wird die von der Grammatik definierte Sprache unter Berücksichtigung der Daten analysiert und das Wort der Sprache gewählt, welches die Daten bestmöglich beschreibt. Die besondere Stärke dieses Vorgehens liegt in der Rekonstruktion von Objekten mit einer vorab unbekanntem Anzahl von Parametern.

Traditionelle Parser versagen bei der Analyse von 3D-Punktwolken mit den in Kapitel 5 beschriebenen Grammatiken, da Punkte eben nicht die Terminale der Grammatik sind. Außerdem sind die Daten mehrdimensional, unvollständig und verrauscht. Daher ergibt sich die Notwendigkeit, eine Art *Übersetzer* zwischen Daten und Grammatik einzuführen, um Teilmengen der 3D-Punktwolke und die Symbole der Grammatik aufeinander abzubilden. Dies wird hier durch Realisierung eines zweistufigen Verfahrens erreicht: Zunächst werden die in Abschnitt 5.1.2 eingeführten Guards verwendet, um die Wahrscheinlichkeit einer Produktionsregel auf Grundlage der 3D-Punktwolke zu schätzen. Darüber hinaus werden die in Abschnitt 4.1 präsentierten Verfahren zur robusten Schätzung parametrisierter Modelle aus 3D-Punktwolken bei jeder Anwendung einer Produktionsregel ausgeführt, um die Form- und Lageparameter der entsprechenden Objekte zu schätzen.

Im Folgenden wird zunächst der Parsingalgorithmus vorgestellt, um anschließend die wesentlichen Schritte des Algorithmus zu diskutieren. In Abschnitt 6.2 wird die Realisierung von Guards beispielhaft erläutert. Nach der Zusammenfassung in Abschnitt 6.3 wird das Kapitel zusammengefasst.

6.1 Der Parsingalgorithmus `parse3d`

Durch die Verwendung von Grammatiken zur Modellierung geometrischer Objekte werden Instanzen des Modells in Form von Ableitungsbäumen repräsentiert. Aufgrund rekursiver Produktionsregeln ist die Menge möglicher Modellinstanzen unendlich groß. Durch Anwendung der in Abschnitt 5.1.2 (S. 85) eingeführten *Guards* lassen sich in jedem Ableitungsschritt die

Wahrscheinlichkeiten der anwendbaren Produktionsregeln bestimmen und so unwahrscheinliche Ableitungen vermeiden. Darüber hinaus ermöglichen die durch Guards ermittelten Wahrscheinlichkeiten die Bewertung der Modellhypothesen.

```
1 function m = parse3d(G, D, k, t) {
2   input
3     G //Grammatik
4     D //Daten: 3D-Punktwolke
5     k //beam – maximale Anzahl an Modellinstanzen
6     t //maximale Tiefe der Ableitungsbäume
7   output
8     m //Ableitungsbaum der besten Modellinstanz
9
10  B = {Startsymbol von G} //Ableitungsbäume
11
12  while (B enthält nichtterminale Ableitungsbäume) {
13    b = entferne aus B den nichtterminalen Ableitungsbaum
14      mit der größten Wahrscheinlichkeit
15    n = das beste nichtterminale Blatt aus b
16    R = die k wahrscheinlichsten, auf n anwendbaren Regeln
17
18    forall r in R {
19      b' = wende r in b auf n an
20      if b' hat Tiefe  $\leq$  t
21        füge b' in B ein
22      if B enthält mehr als k Elemente
23        entferne aus B das Element mit
24          der geringsten Wahrscheinlichkeit
25    }
26  }
27
28  return m = das wahrscheinlichste Element aus B
29 }
```

Listing 6.1: Pseudocode des Parsingalgorithmus parse3d

Im Folgenden wird der Algorithmus *parse3d* (vgl. Listing 6.1) vorgestellt, der die Menge möglicher Ableitungsbäume unter Verwendung von Guards systematisch einschränkt und schließlich den wahrscheinlichsten Ableitungsbaum wählt.

Im Gegensatz zu der Arbeit von Schmittwilken et al. (2009b) basiert *parse3d* nicht auf der Analyse des entsprechenden UND-ODER-Baums (Nilsson, 1980; Zhu und Mumford, 2006), sondern folgt dem Konzept *beam search* (Russel und Norvig, 2003), das einer beschränkten Tiefensuche entspricht, bei der jeweils nur die k wahrscheinlichsten Nachfolger (sogenannter *beam*) betrachtet werden. Im Gegensatz zur greedy-Algorithmen, wie Gradientenverfahren (Cormen et al., 2009) wird nicht nur eine Modellhypothese verfolgt, sondern die k wahrscheinlichsten Hypothesen. Dennoch ist die Identifikation des globalen Optimums auch bei

Verwendung von beam search nicht garantiert. Wegen der unendlichen Größe des Suchraums möglicher Modellhypothesen wird die globale Optimierung hier jedoch nicht thematisiert.

Der Algorithmus *parse3d* erzeugt Ableitungsbäume beginnend beim Startsymbol der Grammatik. Wegen der Implementierung der beschränkten Suche beam search werden nicht alle Ableitungsbäume betrachtet, sondern nur die unter Berücksichtigung der Daten wahrscheinlichsten. Der Algorithmus durchläuft die while-Schleife (Zeilen 12 bis 26) so lange, bis die Menge der Ableitungsbäume (Modellhypothesen) B , in der zunächst nur das Startsymbol der Grammatik enthalten ist (Zeile 10), nur noch terminale Ableitungsbäume enthält. Als *terminiert* werden solche Ableitungsbäume bezeichnet, deren Blätter ausschließlich Terminalsymbole enthalten und somit nicht weiter abgeleitet werden können. In jeder Iteration wird einer der Ableitungsbäume, also eine Modellhypothese, b weiter entwickelt. Dazu wird eines der nichtterminalen Blätter dieses Baums n ausgewählt (Zeile 15) und die k wahrscheinlichsten der auf n anwendbaren Regeln (Zeile 16) auf dieses Symbol angewendet (Zeile 19). So ergeben sich aus b maximal k neue Ableitungsbäume. In jedem Durchlauf der forall-Schleife (Zeilen 18 bis 25) wird einer dieser neuen Ableitungsbäume b' erzeugt und in B eingefügt. Falls B nun mehr als k Ableitungsbäume enthält, wird derjenige mit der geringsten Wahrscheinlichkeit entfernt (Zeilen 22 bis 24). Um ein Terminieren des Algorithmus zu gewährleisten, werden nur solche Ableitungsbäume b' in B eingefügt, deren Tiefe größer ist als die maximal zulässige Tiefe t .

Die Berechnung der Wahrscheinlichkeiten wird durch die in Abschnitt 5.1.2 (S. 85) eingeführten Guards realisiert. Dies wird in Abschnitt 6.2 weiter ausgeführt.

Schließlich erfolgt die Auswahl der wahrscheinlichsten aller geschätzten Modellhypothesen $m \in M$ durch Berechnung der Gesamtwahrscheinlichkeit jedes Ableitungsbaums und der Wahl des Wahrscheinlichsten. Sei die Wahrscheinlichkeit eines Ableitungsbaums $P_b(x)$ durch die Wahrscheinlichkeiten P_r aller zur Ableitung angewendeten Produktionsregeln r_i gegeben als

$$P_b(x) = \prod_i P_r(r_i)$$

so wählt der *parse3d*-Algorithmus den Ableitungsbaum m mit

$$m = \arg \max P_b(x).$$

Im Folgenden werden die wesentlichen Schritte des *parse3d*-Algorithmus aufgegriffen: In Abschnitt 6.1.1 wird das Anwenden von Produktionsregeln (Zeile 21) erläutert, Abschnitt 6.1.2 diskutiert die Selektion des abzuleitenden Nichtterminals (Zeile 16) und in Abschnitt 6.1.3 wird die Selektion der Produktionsregeln (Zeile 17) vorgestellt.

6.1.1 Anwenden von Produktionsregeln

In diesem Abschnitt wird die Bedeutung des Ableitens eines Nichtterminalsymbol im Rahmen des *parse3d*-Algorithmus erläutert.

Wird eine Produktionsregel r auf das Symbol n bzw. auf den entsprechenden Knoten des Ableitungsbaums angewendet, so geschieht zweierlei

1. Hinzufügen der Symbole der rechten Seite von r als Nachfolger von n im Ableitungsbaum b_i ,
2. Rekonstruktion der Symbole der rechten Seite von r .

Es werden also Lage- und Formparameter durch Interpretation der 3D-Punktwolke geschätzt. Jedem Symbol ist hierzu ein entsprechendes Schätzverfahren wie der in Abschnitt 4.1 vorgestellte MOSAP-Algorithmus zugeordnet. Das zur Rekonstruktion notwendige Vorwissen ist in den Symbolen der rechten und linken Seite der Produktionsregel kodiert. Aufgrund der in Abschnitt 5.1.3 (S. 86) eingeführten Unifikation ist auch das in anderen Symbolen kodierte Vorwissen verfügbar.

Entsprechend werden die bei der Rekonstruktion geschätzten Lage- und Formparameter zurück an die Grammatik gegeben, wo sie als Attributwerte der jeweiligen Symbole vorgehalten werden. Durch Unifikation werden auch diese wiederum an andere Symbolen vererbt.

6.1.2 Selektion von Nichtterminalen

Im Folgenden werden die parse3d zugrunde liegenden Kriterien zur Selektion des abzuleitenden Nichtterminalsymbols hergeleitet.

Zur weiteren Ableitung des Ableitungsbaums muss im parse3d-Algorithmus zunächst das nichtterminale Blatt n ausgewählt werden, das abgeleitet werden soll. Aus der zuvor in Abschnitt 6.1.1 beschriebenen Rekonstruktion der Rechteseite Symbole einer Produktionsregel bei Anwendung einer Produktionsregel folgt, dass n bereits rekonstruiert wurde, seine Form- und Lageparameter also schon geschätzt sind.

Entsprechend der in Abschnitt 3.1 (S. 43) vorgestellten Konzepte des architektonischen Entwurfs bedingen die großen Fassadenobjekte häufig die Struktur der kleineren Objekte, die dann beispielsweise die Orientierung erben. Um die Vererbung dieses bei der Rekonstruktion hilfreichen Vorwissens zu ermöglichen, sind die Symbole, die *große* Fassadenteile repräsentieren, bei der Auswahl von n zu bevorzugen. Die Größe eines Symbols $g(s)$ ist aus den geschätzten Formparametern (Attributen) abzuleiten.

Bei der Auswahl des Symbols n ist zu berücksichtigen, wie gut n rekonstruiert werden konnte. Da die *Punktdichte* die Qualität der Rekonstruktion wesentlich beeinflusst, ist das n zu wählen, in dessen Oberfläche die höchste Punktdichte aufweist. Wegen der Orientierung der 3D-Punktwolken genügt die Betrachtung der Punktdichte $d(s)$ innerhalb des kleinsten, achsparallelen Rechtecks (Minimum Bounding Rectangle, MBR) von n . Auch Becker (2009) beginnt mit der Rekonstruktion in Bereichen höchster Punktdichte.

Schließlich lässt sich für jedes Symbol des Ableitungsbaums die *Wahrscheinlichkeit* $P_s(x)$ berechnen, die sich aus dem Produkt der durch Guards bestimmten Wahrscheinlichkeiten $P_g(x)$ der zur Ableitung angewendeten Produktionsregeln r_1, r_2, \dots, r_j ergibt

$$P_s(x) = \prod_{i=1}^j P_g(r_i).$$

Ein Gütemaß für das Symbol s ergibt sich mit den beiden zuvor genannten Kriterien Größe $g(s)$ und Punktdichte $d(s)$ zu

$$q(s) = g(s) d(s) p_s(s).$$

Es ist demnach das Nichtterminal n aus allen Nichtterminalen des Ableitungsbaums zu wählen, das sich nach

$$n = \arg \max q(s)$$

bestimmt.

6.1.3 Selektion von Produktionsregeln

Der folgende Abschnitt zeigt die Kriterien zur Selektion der anzuwendenden Produktionsregeln auf.

Grundsätzlich können in kontextfreien Grammatiken mehrere Produktionsregeln das gleiche Symbol auf der linken Seite haben. Dies trifft insbesondere wegen der im vorherigen Kapitel 5 erläuterten Abbildung von Generalisierung und Aggregation auf Produktionsregeln auch auf die parse3d zugrundeliegende Fassadengrammatik (vgl. Abschnitt 5.2, S. 87) zu.

Für das im vorherigen Schritt des Algorithmus ausgewählte Nichtterminal n sind nun aus allen Produktionsregeln, die n als Symbol der linken Seite haben, diejenigen auszuwählen, die unter Berücksichtigung des verfügbaren Vorwissens zu guten Modellinstanzen führen. Bereits in Abschnitt 5.1.2 (S. 85) wurden hierzu Guards eingeführt, die als besondere Art semantischer Regeln jeweils einer Produktionsregel r zugeordnet sind und für diese basierend auf den zu analysierenden Daten Wahrscheinlichkeiten $p_g(r)$ berechnen.

Um einerseits die Anzahl der von parse3d betrachteten Modellhypothesen zu begrenzen, aber andererseits die Diversität möglicher Hypothesen zu unterstützen und alternative Hypothesen zu verfolgen, wurde in parse3d, ähnlich zu beam search, eine Beschränkung des Suchraums auf die k wahrscheinlichsten Produktionsregeln (beam) realisiert. Bei Betrachtung der Fassadengrammatik (vgl. Listing 5.2, S. 88) fällt jedoch auf, dass je Linkeseitesymbol maximal drei Regeln existieren, sodass die Wahl von $k = 3$ bereits dazu führt, dass die gesamte, durch die Fassadengrammatik definierte Sprache analysiert wird. Außerdem würde der parse3d-Algorithmus wegen der rekursiven Regeln P_4 , P_8 , P_{17} und P_{18} nicht terminieren. Daher wird zusätzlich zum beam k der Schwellwert q für die Wahrscheinlichkeit der zu wählenden Produktionsregel r eingeführt. So wird die rekursive Auswahl von Produktionsregeln aufgrund der mangelnden Unterstützung durch die Daten verhindert. Sei

$$(r_1, r_2, \dots, r_l)$$

die Menge der auf das gewählte Nichtterminal n anwendbaren Produktionsregeln und

$$(P_g(r_1), P_g(r_2), \dots, P_g(r_l))$$

die geordnete Menge der durch die Guards ermittelten Wahrscheinlichkeiten mit

$$P_g(r_j) \geq P_g(r_{j+1}) \quad \forall j \in \mathbb{N}, j \leq l,$$

so werden zur Ableitung weiterer Modellhypothesen lediglich die Regeln ausgewählt, die mit k und q aus dem parse3d-Algorithmus durch den beam

$$R = \{r_i \mid r_i \geq q \text{ mit } i \in [1, k]\}$$

definiert sind.

6.1.4 Zusammenfassung *parse3d*

In diesem Abschnitt wurde der Algorithmus *parse3d* zur Rekonstruktion aggregierter Fassadenstrukturen eingeführt. Der Algorithmus realisiert einen Parser, der gegebene Daten basierend auf einer Grammatik analysiert und das Wort der Sprache identifiziert, das durch die Daten beschrieben ist. Um nicht alle Worte der Sprache erzeugen und bewerten zu müssen, wird die Menge der Ableitungsbäume durch Bedingung der angewendeten Produktionsregeln beschränkt. Dazu werden die Wahrscheinlichkeiten $P_g(r)$ aller in einem Ableitungsschritt anwendbaren Produktionsregeln durch die in Abschnitt 5.1.2 eingeführten Guards geschätzt. Schließlich werden lediglich die k wahrscheinlichsten Regeln angewendet, deren Wahrscheinlichkeit $P_g(r) \geq q$ über einem Schwellwert q liegt. Die abschließende Modellselektion erfolgt anhand der von den Guards bestimmten Wahrscheinlichkeiten der zur Ableitung einer Modellhypothese angewendeten Produktionsregeln.

In den Abschnitten 6.1.1 bis 6.1.3 wurde die Anwendung von Produktionsregeln auf ein Nichtterminalsymbol, die Selektion des abzuleitenden Nichtterminals sowie die Selektion der anzuwendenden Produktionsregeln ausführlich erläutert.

Es folgt im nächsten Abschnitt 6.2 die Erläuterung der Realisierung der Guards am Beispiel von Erkern und Fenstern.

6.2 Realisierung der Guards

Im Folgenden wird die Realisierung der in Abschnitt 5.1.2 (S. 85) eingeführten Guards vorgestellt.

Guards werden hier als Mechanismen zur Bewertung von Produktionsregeln verstanden, welche die Wahrscheinlichkeit einer Produktionsregel r entsprechend der gegebenen Daten d bestimmen: $P(r|d)$. Die Daten sind einerseits durch das in Abschnitt 3.4 (S. 51) (vgl. Anhang A, S. 115) beschriebene Vorwissen gegeben und ergeben sich andererseits aus dem Kontext des Parsingalgorithmus. Letzterem wird zunächst eine 3D-Punktwolke übergeben, die schrittweise wie oben beschrieben *vom Großen ins Kleine* analysiert wird. So werden im Verlauf des Algorithmus immer kleinere Teilmengen der 3D-Punktwolke betrachtet aber auch Vorwissen aus bereits rekonstruierten Objekten verwendet.

In der Fassadengrammatik (vgl. Listing 5.2, S. 88) existieren bis auf eine Ausnahme zu jedem Linkesitesymbol genau zwei Produktionsregeln. Diese modellieren entsprechende dichotome Entscheidungen wie das Vorhandensein eines Erker. Für die Wahrscheinlichkeiten der Regeln eines solchen Paares (r_1, r_2) gilt

$$P(r_2 | d) = 1 - P(r_1 | d). \quad (6.1)$$

Entsprechend können diese dichotomen Regeln durch einen Guard repräsentiert werden, der die ermittelte Wahrscheinlichkeit je nach Regel entsprechend 6.1 berechnet.

Bereits in Abschnitt 5.1.2 (S. 85) wurde gezeigt, dass sich ein Guard bei gegebener Wahrscheinlichkeit einer Produktionsregel $P(r)$ aufgrund des Bayestheorems auf den Likelihood-Term $P(d|r)$ reduzieren lässt:

$$P(r | d) = \frac{P(d|r) P(r)}{P(d)}.$$

Im Folgenden werden nach allgemeinen Überlegungen zu relevanten Mustern in Abschnitt 6.2.1 exemplarisch Guards zur Identifikation von Erkern Abschnitt 6.2.2 sowie zur Identifikation von Fenster Abschnitt 6.2.3 erläutert.

6.2.1 Relevante Muster

Die für Guards relevanten Muster in 3D-Punktwolken werden nachfolgend erläutert.

Wie oben gezeigt wurde, lassen sich Guards auf die Bestimmung der Wahrscheinlichkeit der Daten d entsprechend einer gegebenen Regel r

$$P(d|r)$$

reduzieren. Da jeder Guard als besondere semantische Regel genau einer Produktionsregel zugeordnet ist, wird die Schreibweise $P_g(d)$ verwendet.

Bereits in Abschnitt 4.1.1 (S. 60) wurde beim lagebasierten Sampling Wahrscheinlichkeiten von Beobachtungen, also einzelnen Punkten $P(\mathbf{x})$ als Produkt der Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Koordinatenwerte geschätzt. Dort waren die Wahrscheinlichkeitsdichten jedoch aufgrund des quantifizierten Vorwissens gegeben.

Im Folgenden wird gezeigt, dass sich aus den gegebenen Beobachtungen die Wahrscheinlichkeitsdichten der Guards $P_g(d)$ ableiten lassen.

Da Guards zur Auswahl einer Teilmenge der auf ein Symbol anwendbaren Regeln verwendet werden, genügt es, die rechte Seite der Produktionsregeln zu betrachten. Beim Betrachten der Produktionsregeln der Fassadengrammatik in Listing 5.2 (S. 88) zeigt sich, dass nahezu alle durch die Symbole der rechten Seite modellierten Objekte durch vertikale, planare Flächen approximiert werden können. Eine Ausnahme bilden Fenster und Türen, die Löcher in der Punktwolke entsprechen. Sind mehrere Symbole auf der rechten Seite der Produktionsregel enthalten, so sind geometrischen Entsprechungen der Objekte parallel oder orthogonal zueinander.

Zur Bestimmung eines Guards mit $P_g(d)$ ist also je nach Produktionsregel bzw. Guard das Vorhandensein solcher paralleler, planarer Flächen oder Löcher zu bewerten. Durch orthogonale Projektion werden 3D-Punktwolken ins Zweidimensionale überführt und vertikale Ebenen sowie Löcher lassen sich wie folgt identifizieren:

1. Parallele, vertikale Ebenen werden in der Projektion auf die Horizontale auf parallele Geraden abgebildet.
2. Löcher bleiben in der Projektion auf die entsprechende Ebene erhalten.

Werden die 3D-Punktwolken nun in die entsprechende Ebene projiziert, so werden Wände zu lang gestreckten Bereichen mit sehr hoher Punktdichte und Fenster werden zu rechteckigen Bereichen mit sehr geringer Punktdichte. Wegen der angenommenen Achsparallelität sind die 3D-Punktwolken zumeist in die (1) xy -Ebene und die (2) xz -Ebene zu projizieren. Ohne die angenommene Orientierung der 3D-Punktwolken ergeben sich die für die Projektionen zu wählenden Ebenen aus einer robusten Ebenenschätzung (z.B. durch MLESAC, Torr und Zisserman, 2000).

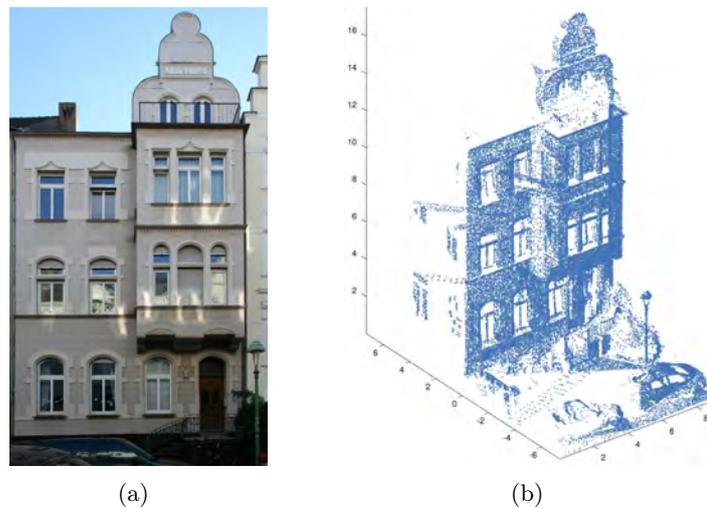


Abbildung 6.1: Foto und 3D-Punktwolke eines Gebäudes mit Erker

6.2.2 Identifikation von Erkern

Die Realisierung des Guards zur Identifikation von Erkern wird im Folgend beispielhaft an der in Abbildung 6.1(b) gezeigten 3D-Punktwolke erläutert.

Das Regelpaar (P_1, P_2) der Fassadengrammatik (vgl. Listing 5.2, S. 88) modelliert die dichotome Entscheidung der Existenz einer Teilfassade. Da *Teilfassade* in den Produktionsregeln P_3 und P_4 stets in das Symbol *Erker* überführt wird, entspricht die Existenz einer Teilfassade also der Existenz eines Erkers.

Aus diesen Überlegungen und der Dichotomie der Regeln folgt, dass die beiden Guards der Produktionsregeln P_1 und P_2 der Identifikation von Erkern in Punktwolken bzw. der Bestimmung der Wahrscheinlichkeit der Existenz eines Erkers entsprechen. Letzteres sei im Folgenden erläutert.

Durch die Projektion der 3D-Punktwolke in die xy -Ebene werden planare vertikale Objekte zu dichten, lang gestreckten Punktclustern. Es genügt die Analyse der y -Koordinaten, da die x -Achse in der Hauptfassade liegt und sich Wände, die zu dieser parallel sind, nur durch ihre y -Werte unterscheiden lassen. Diese eindimensionale Clusteranalyse lässt sich durch die Schätzung der Dichte der y -Koordinaten durch Kerndichteschätzer realisieren, da Bereiche hoher Punktdichte zu einer hohen Wahrscheinlichkeit des entsprechenden Koordinatenwertes führen und sich somit in schmalen, hohen Peaks in der geschätzten Dichte niederschlagen. Abbildung 6.2 zeigt links in orange die geschätzte Dichte des in die Horizontale projizierten (rechts, blau) Datensatzes. Die unterschiedliche Skalierung der x - und y -Achse ist zu beachten.

Die Form eines Peaks lässt sich durch seine Krümmung κ beschreiben. Seien für einen Funktionswert $f(x)$ die nächsten Wendepunkte an den Stellen $u \leq x$ und $v > x$, so ist die Krümmung in diesem Punkt mit der Höhe

$$h(x) = f(x) - \frac{f(u) + f(v)}{2}$$

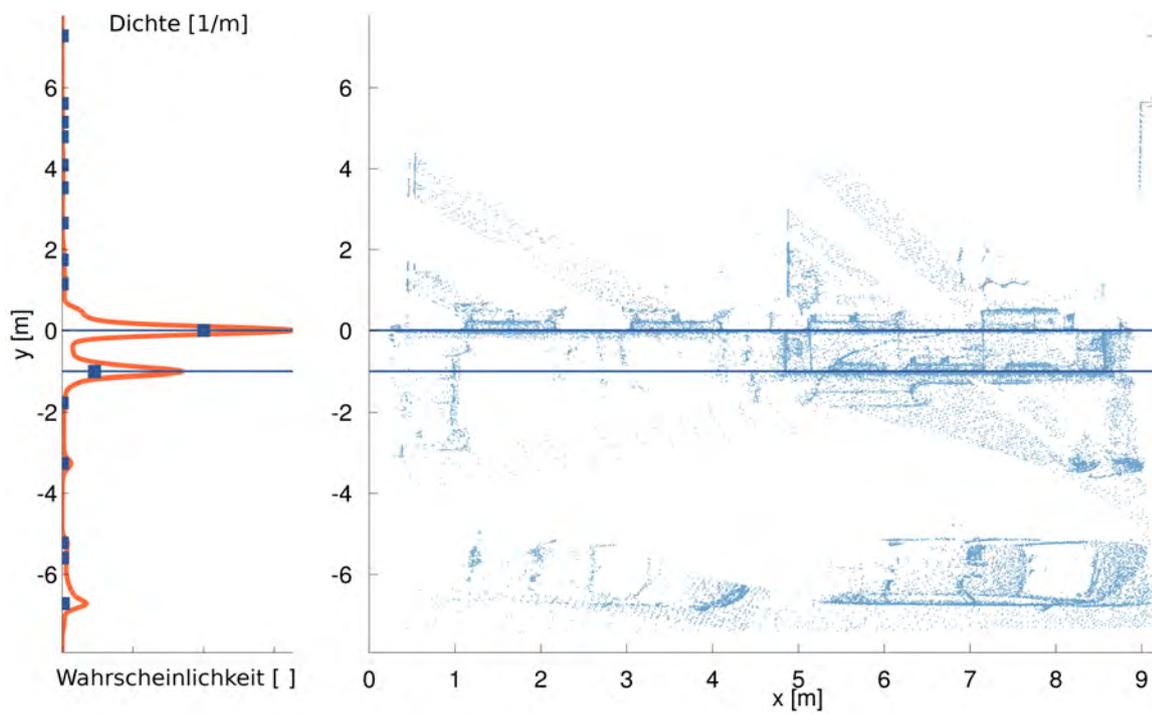


Abbildung 6.2: xy -Projektionen Datensatzes (rechts) und die geschätzte Dichte der y -Koordinaten (links, orange) sowie die geschätzten Wahrscheinlichkeiten der Peaks (links, blau)

und der Breite

$$b(x) = v - u, \tag{6.2}$$

approximiert durch

$$\kappa(x) = \frac{h(x)}{b(x)^2}.$$

Ein breiter, flacher Peak hat somit eine geringe Krümmung, ein schmaler, hoher Peak hingegen eine hohe Krümmung. Es ist offensichtlich, dass κ an den Positionen lokaler Maxima von $f(x)$ ebenfalls maximale Werte annimmt, insbesondere wenn $b(x)$ klein und $h(x)$ groß ist. Dies ist gerade durch die oben beschriebene schmale Form von Peaks gegeben. Somit wird die geschätzte Dichte $p(x)$ der Koordinatenwerte mit $\kappa(x)$ gewichtet

$$p_\kappa(x) = \kappa(x) p(x).$$

Nach entsprechender Normierung

$$\int_{-\infty}^{\infty} p_\kappa(x) dx = 1$$

ergibt sich der Bereich höchster Punktdichte an der Stelle

$$x_{\max} = \arg \max p_\kappa(x) \tag{6.3}$$

mit der Wahrscheinlichkeit $P(x_{\max})$.

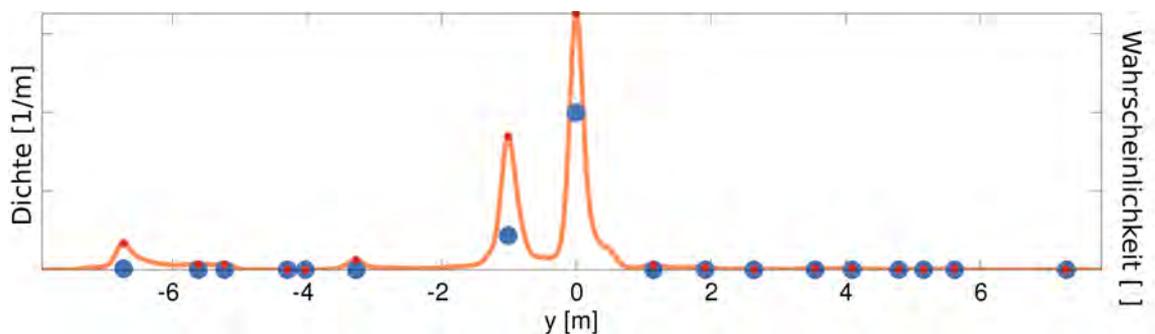


Abbildung 6.3: Detailansicht der geschätzten Dichte aus Abbildung 6.2 (orange) mit lokalen Maxima (rot) sowie den anhand der Krümmung bestimmten Wahrscheinlichkeiten $p(x_i)$ (blau)

Abbildung 6.3 zeigt eine Detailansicht der Dichte der y -Koordinaten aus Abbildung 6.2. Es sind vier deutliche Peaks zu erkennen, die mit abnehmender y -Koordinate durch folgende Objekte zu erklären sind: Hauptfassade ($y = 0$), Erker ($y = 1$), Straßenlaterne ($y = 3,3$) und Auto ($y = 6,7$). Die Straßenlaterne ist zwar sehr schmal, aufgrund ihrer Höhe und der Nähe zum Scanner werden jedoch sehr viele Punkte auf der zum Laserscanner gewandten Seite gemessen.

Der Annahme folgend, dass der höchste Peak durch die Fassade und der zweithöchste Peak durch die zur Fassade parallele Fläche des Erkers induziert wird, ist zur Identifikation von

Erkern die Bewertung des zweithöchsten Peaks sowie dessen Abstand zum höchsten Peak von Interesse.

Sei der höchste Peak nach Gleichung 6.3 an der Position x_{\max} bestimmt und der zweithöchste Peak entsprechend an $x_{\max 2} < x_{\max}$ mit der Wahrscheinlichkeit $P(x_{\max 2})$. Wegen der Modellannahme, dass diese Peaks die Lage der parallelen Flächen von Erker und Fassade identifizieren, lässt sich die Tiefe des Erkers durch

$$t = x_{\max} - x_{\max 2} \quad (6.4)$$

bestimmen. Mit der der bekannten Wahrscheinlichkeitsdichte der Tiefe von Erkern $p_t(x)$ (vgl. Abbildung A.1(e), S. 115) ergibt sich die Wahrscheinlichkeit eines Erkers zu

$$P_e(t) = \int_{t-\epsilon}^{t+\epsilon} p_t(x) dx. \quad (6.5)$$

Wegen der angenommenen Orientierung der Punktwolken ist $x_{\max 2} < x_{\max}$ anzunehmen, da der Erker stets *vor* der Fassade liegt und somit die geringeren y -Werte hat. Ist dies nicht erfüllt, so wird $t < 0$ und $P_e(t)$ geht wegen p_t gegen null.

Das hier verwendete Genauigkeitsmaß ϵ ist wegen der Bestimmung der Tiefe des Erkers aus der Differenz der geschätzten Lage der beiden höchsten Peaks (vgl. nach 6.4) nicht durch die Meßgenauigkeit der einzelnen Punkte der 3D-Punktwolken definiert, sondern durch die Genauigkeit, mit der das lokale Maximum die y -Koordinate der entsprechenden Ebene beschreibt. Genähert wird diese Genauigkeit als halbe Breite des Peaks angenommen. Es ergibt sich aufgrund der Fehlerfortpflanzung

$$\epsilon = \frac{1}{2} \sqrt{b(x_{\max})^2 + b(x_{\max 2})^2}$$

Neben der Bewertung der Existenz eines Erkers liefert dieser Guard auch Informationen über y -Koordinaten von Hauptfassade und Erker sowie die daraus resultierende Tiefe des Erkers.

Zusammenfassung

In diesem Abschnitt wurde erläutert, wie basierend auf der Wahrscheinlichkeitsdichte der y -Koordinaten die Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins eines Erkers $P_e(x_1, x_2)$ ermittelt wird. Der Guard der Produktionsregeln P_2 der Fassadengrammatik wird nach dem gezeigten Konzept implementiert. Der Guard von P_1 berechnet das entsprechende Komplement zu 1, da er eben die Wahrscheinlichkeit des Nichtvorhandenseins eines Erkers bewertet.

6.2.3 Identifikation von Öffnungen

Im Folgenden wird das im vorherigen Abschnitt 6.2.2 vorgestellte Konzept zur Realisierung der Guards zur Identifikation von Erkern auf die Identifikation von Fenstern übertragen.

Fenster und Türen sind Öffnungen in Wänden. Die Guards der Regeln P_9 und P_{10} müssen demnach die Existenz von entsprechenden Öffnungen bewerten. Da das Symbol der linken

Seite der Produktionsregeln **Wand** indirekt aus den Symbolen **Hauptfassade** und **Teilfassade** abgeleitet wurde, ist die einer Wand entsprechende Teilmenge der 3D-Punktwolke in erster Näherung schon durch den oben beschriebenen Guard der Produktionsregeln P_1 und P_2 bestimmt und beim Anwenden der Produktionsregel auch rekonstruiert worden. Die beiden in Abbildungen 6.4 dargestellten Punktwolken (blau) zeigen diese beiden Teilmengen.

Im Gegensatz zu Vorsprüngen zeichnen sich Fenster in der xz -Projektion nicht durch eine hohe Punktdichte, sondern durch eine sehr geringe Anzahl von Punkten aus. Dementsprechend analysieren die Guards der Produktionsregeln P_9 und P_{10} die Dichte der x - und z -Koordinaten auf ihre lokalen Minima hin. Entsprechend den in Abschnitt 6.2.2 beschriebenen Guards werden hier die Minima der Dichte detektiert und entsprechende Wahrscheinlichkeiten berechnet.

Wegen der vorausgegangenen Ebenenschätzung und der starken räumlichen Beschränkung der jeweiligen Teilpunktwolke sind die geschätzten Dichten im Vergleich zur Identifikation von Erkern deutlich glatter. Wie in Abbildung 6.4 zu sehen ist, unterscheiden sich die Muster, die Fenster in den Wahrscheinlichkeitsdichten hervorrufen, auch in der Breite der Extrema von den Peaks, die zur Detektion von vertikalen Wänden betrachtet wurden. Die nun gesuchten negativen Peaks entsprechen „breiten Tälern“, deren Breite der Breite (x -Koordinaten) oder Höhe (z -Koordinaten) des Fensters entspricht.

Aufgrund der bereits stark reduzierten Punktwolke und der daraus resultierenden Glattheit der Dichte, werden zur Identifikation von Fenstern alle lokalen Minima der geschätzten Dichte der x - und z -Koordinaten p_x und p_z angehalten. Für jedes Minimum der Dichte wird die Wahrscheinlichkeit $P_{w,x}$, dass das Minimum durch ein Fenster oder eine Spalte, bzw. $P_{w,z}$, dass das Minimum durch ein Fenster oder eine Zeile von Fenstern induziert wurde, geschätzt. Mit der Dichte der Fensterbreite p_b sowie Fensterhöhe p_h (vgl. Abbildungen A.5(d) und A.5(f), S. 119) und der Breite b_x bzw. b_z der negativen Peaks ergibt sich

$$P_{w,x}(b_x) = \int_{b_x-\epsilon}^{b_x+\epsilon} p_b(x)dx \quad \text{bzw.} \quad P_{w,z}(b_z) = \int_{b_z-\epsilon}^{b_z+\epsilon} p_h(x)dx.$$

Die vom Guard ermittelte Wahrscheinlichkeit der Existenz von Fenstern P_w ergibt sich aus der Summe der Wahrscheinlichkeiten

$$P_w = \frac{\sum_i P_{w,x}(b_{x,i}) + \sum_j P_{w,z}(b_{z,j})}{i + j}.$$

Zusammenfassung

In Analogie zum vorherigen Abschnitt 6.2.2 wurden die Guards zur Identifikation und Bewertung von Öffnungen erläutert. Auch hier wurde auf die geschätzte Wahrscheinlichkeitsdichte der Koordinatenwerte sowie die aus dem quantifizierten Vorwissen abgeleiteten Dichten der Formparameter zurückgegriffen.

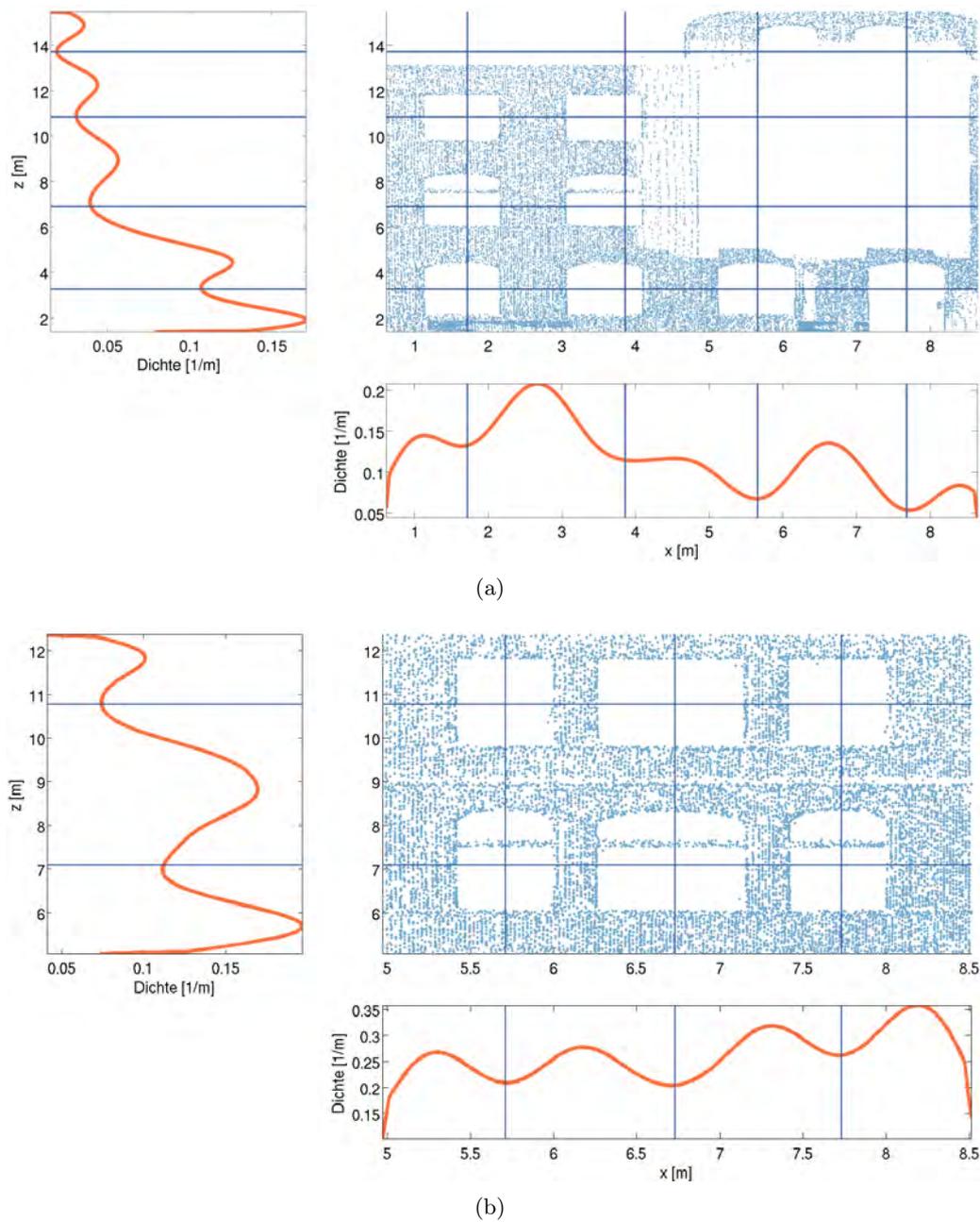


Abbildung 6.4: Guards für Produktionsregeln zum Ableiten des Symbols *Wand*: xz -Projektionen der beiden Teilpunktswolken für Hauptfassade (oben) und Erker (unten) und die geschätzte Dichte der x - und z -Koordinaten (orange) mit relevanten Minima.

6.3 Zusammenfassung

Nachdem in den vorherigen Kapiteln die abstrakte Modellierung von Fassaden sowie die Repräsentation von quantifiziertem Vorwissen (Kapitel 3), die Rekonstruktion einzelner Fassadenteile (Kapitel 4) sowie die Überführung des semantischen und geometrischen Modells in eine attributierte, kontextfreie Fassadengrammatik (Kapitel 5) vorgestellt wurden, vereinte dieses Kapitel die dort präsentierten Konzepte und Verfahren.

Es wurde der Parsingalgorithmus *parse3d* vorgestellt, der es erlaubt, aggregierte Strukturen wie Fassaden aus 3D-Punktwolken durch die systematische und datenbezogene Ableitung der Fassadengrammatik zu rekonstruieren. Der Ableitungsbaum, der das rekonstruierte Objekt beschreibt, wird dabei beginnend bei der Wurzel iterativ erzeugt. Die wesentlichen Schritte des Algorithmus, nämlich die Selektion von abzuleitenden Nichtterminalen sowie die Selektion anzuwendender Produktionsregeln wurden in den Abschnitten 6.1.2 und 6.1.3 beschrieben.

Wegen des Unterschieds von Grammatiksymbolen, die Objekte durch B-Rep modellieren, und der 3D-Punktwolken, die Oberflächen unvollständig, verrauscht und diskretisiert beschreiben, werden zwei Wege der Abbildung von Symbolen und Punkten aufeinander verwendet: *Guards* und *Rekonstruktion*. Letztere bedient sich der in Kapitel 4 vorgestellten Verfahren und schätzt die Lage- und Formparameter der durch ein Rechteseitesymbol repräsentierten Objekte immer dann, wenn eine Produktionsregel angewendet und die entsprechenden Blätter dem Ableitungsbaum hinzugefügt werden. Dabei sind Terminalsymbole wegen ihrer geringen Anzahl von Parametern stets vollständig mit robusten Schätzern wie MOSAP (vgl. Kapitel 4) zu schätzen. Die inneren, nichtterminalen Knoten des Ableitungsbaums werden hierzu durch einfache geometrische Objekte wie planare Maschen oder Quader approximiert.

Das Konzept der Guards wurde bereits in Kapitel 5 eingeführt und hier für das Parsing von 3D-Punktwolken konkretisiert. Ein Guard ist einer Produktionsregel zugeordnet und schätzt auf Grundlage der zu interpretierenden Daten die Wahrscheinlichkeit für das durch die Regelanwendung erzeugte Objekt ohne die entsprechenden Objekte jedoch exakt zu rekonstruieren. Es wird lediglich die Anwendbarkeit der Regel geschätzt, um so bei der Ableitung eines Symbols die wahrscheinlichste der anwendbaren Regel zu wählen. Guards verwenden auch das im Ableitungsbaum unifizierte Vorwissen, dass sich aus der Rekonstruktion anderer Teilobjekte ergibt. So wird die Vererbung von Parametern und die Bedingung ihrer Identität ermöglicht.

Es wurde nach der allgemeinen Betrachtung der für Guards relevanten Muster in Abschnitt 6.2.1 die beispielhafte Realisierung von Guards durch Verwendung der geschätzten Dichte der Koordinatenwerte sowie der *a priori* Wahrscheinlichkeiten der Formparameter der zu rekonstruierenden Objekte vorgestellt. In der Projektion der 3D-Punktwolken in die Horizontale werden vertikale, planare Flächen wie Wände zu linienhaften Punktklustern hoher Punktdichte, die den Maxima der entsprechenden Dichten entsprechen. So wurde in Abschnitt 6.2.2 ein Guard präsentiert, der die Auswahl von Produktionsregeln zum Erzeugen von Fassaden mit und ohne Erker ermöglicht. In Analogie dazu wurde Abschnitt 6.2.3 ein weiterer Guard vorgestellt, der Minima in den Dichten gewichtet und so die Anwendung der entsprechenden Regeln zum Erzeugen von Fenstersymbolen steuert.

7 Schlussbemerkungen

Die vorliegende Arbeit hatte die Integration attributierter Grammatiken und robuster Schätzer zur Rekonstruktion und Interpretation von Fassaden aus 3D-Punktwolken zum Ziel.

Die Rekonstruktion, also die Erfassung der Geometrie, und die Interpretation, also die Erfassung der Semantik in Form von Aggregations- und Generalisierungsbeziehungen, wurden hierzu in einem Parsingalgorithmus kombiniert, der auf einer iterativen Ableitung der aufgestellten Fassadengrammatik basiert. Die Verwendung von Attributgrammatiken als generisches Modell komplexer Strukturen und deren Kombination mit robusten Schätzverfahren zur Rekonstruktion einfacher, parametrischer Modelle ermöglicht die Schätzung von Modellen mit einer vorab unbekanntem Zahl von Parametern.

Durch die Quantifizierung von Vorwissen über Lage- und Formparameter der einzelnen Teilobjekte in Form von Wahrscheinlichkeitsdichten wurde die Robustheit des vorgestellten Schätzers MOSAP (Model Based Sampling and Prediction) gesteigert. Die abgeleiteten *a priori* Wahrscheinlichkeiten wurden auch eingesetzt, um bei der Ableitung der Grammatik das abzuleitende Nichtterminal sowie die anzuwendende Produktionsregel zu bestimmen.

Die Schnittstelle zwischen Symbolen der Grammatik und der diskretisierten Oberflächenbeschreibung durch 3D-Punktwolken aus terrestrischem Laserscanning wurde sowohl durch die zur Auswahl von Produktionsregeln eingeführten Guards als auch durch die Integration von MOSAP erreicht.

Dieser Arbeit lagen die in Abschnitt 1.2.1 (S. 4) formulierten Arbeitshypothesen zugrunde, die in den Kapiteln 3 bis 6 verifiziert wurden:

- (1) Vorwissen einfach strukturierter Objekte lässt sich durch nicht-parametrische Wahrscheinlichkeitsdichten repräsentieren. Es wurde gezeigt, dass die Dichten der entsprechenden Form- und Lageparameter durch Kerndichteschätzer bestimmt und so in das modellbasierte, robuste Schätzverfahren MOSAP sowie den Parsing-Algorithmus `parse3d` integriert werden können.
- (2) Aggregations- und Generalisierungsbeziehungen lassen sich durch die Produktionsregeln attributierter Grammatiken und die Geometrie sowie die *a priori* Wahrscheinlichkeiten durch entsprechende Attribute modellieren. Die Generalizität dieser Grammatiken lässt sich durch das synthetische Generieren von 3D-Fassadenmodellen zeigen.

- (3) Die entsprechende Formulierung der Grammatik ermöglicht es, sämtliche Terminalsymbole derart zu wählen, dass ihre geometrische Entsprechung durch wenige Parameter beschrieben werden kann. Solche Objekte lassen sich mit robusten Schätzern rekonstruieren und so die jeweilige Teilmenge der 3D-Punktwolke auf das Grammatiksymbol abbilden.
- (4) Aufgrund rekursiver Produktionsregeln wird die Menge möglicher Ableitungsbäume unendlich groß. Daher ist das Parsing und die damit verbundene Modellselektion nur durch sinnvolle Einschränkung der Menge möglicher Hypothesen möglich. Diese Einschränkung wird durch Guards realisiert, die basierend auf der Wahrscheinlichkeitsdichte der Form- und Lageparameter sowie der Dichte der Koordinatenwerte Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Regeln bestimmen und diese so vergleichbar machen.

Im folgenden Abschnitt 7.1 wird die Arbeit resümiert sowie die Übertragbarkeit der vorgestellten Konzepte diskutiert (vgl. Abschnitt 7.2). Abschließend wird in Abschnitt 7.3 ein Ausblick auf zukünftige Untersuchungen der verbleibenden Probleme skizziert.

7.1 Zusammenfassung

Der folgende Abschnitt fasst die einzelnen Kapitel dieser Arbeit zusammen.

Nach der Einleitung und Motivation in Kapitel 1 und dem Grundlagenkapitel 2, in dem die theoretischen Grundlagen dargestellt und eine Übersicht über den Stand der Forschung gegeben wurde, folgte eine erste Formalisierung des Vorwissens. Das semantische Modell wurde durch Begriffsdefinitionen sowie die Beschreibung der Aggregations- und Generalisierungs- bzw. Spezialisierungsbeziehungen der einzelnen Objekte in Form eines UML-Diagramms eingeführt. Das anschließend beschriebene geometrisch-topologische Modell basiert auf B-Rep. Neben der Beschreibung der verwendeten Daten (terrestrische 3D-Punktwolken und Bilder) wurde die Quantifizierung von Vorwissen über Lage- und Formparameter sowie deren Repräsentation durch Häufigkeitsverteilungen und geschätzte Wahrscheinlichkeitsdichten erläutert. Die hierzu verwendeten Kerndichteschätzer wurden entsprechend diskutiert. Die begleitend vorgestellten architektonischen Entwurfsprinzipien wie Symmetrie und Proportion konnten durch die erfassten Häufigkeitsverteilungen belegt werden.

Kapitel 4 thematisierte die Rekonstruktion einzelner Fassadenteile aus 3D-Punktwolken. Es wurde der neue robuste Schätzer MOSAP eingeführt, der auf dem hypothesize-and-verify Paradigma basiert. Im Gegensatz zu den bekannten Algorithmen dieser Art integriert MOSAP verstärkt Vorwissen über Lage- und Formparameter der einzelnen Objekte. Das modellbasierte Sampling ist zunächst zufällig, jedoch werden durch hierarchisches lage- und formbasiertes Sampling nur solche Samples zur Instanziierung der Modelle verwendet, die mit hoher Wahrscheinlichkeit der jeweiligen Modellannahme entsprechen. Hierzu werden die Samples entsprechend der Dichte ihrer Lage- und Formparameter bewertet. Die Bewertung der Modellinstanz erfolgt schließlich auf Grundlage der eingeführten Prädiktionsgüte, die

aus dem hinreichend genauen Raumbezug der Modellinstanz resultiert und der Anzahl von Beobachtungen entspricht, die auf der Oberfläche der Modellinstanz liegen. Die Bestimmung der Prädiktionsgüte ist durch die verwendete räumliche Datenstrukturen sehr effizient. Somit lassen sich auch sehr kleine Objekte mit einer geringen Anzahl entsprechender Beobachtungen schätzen und die sonst übliche und aufwendige Berechnung der Abstände aller Beobachtungen zur Modellinstanz entfällt.

Die Rekonstruktion durch Prädiktion wurde am Beispiel von Treppen und Fenstern erläutert und durch die Ergebnisse empirischer Untersuchungen belegt.

Die Formalisierung und Integration des Vorwissens in attributierte Grammatiken wurde in Kapitel 5 vorgestellt. Zu diesem Zweck wurde das Konzept attributierter Grammatiken adaptiert und derart erweitert, dass semantische Regeln nicht länger nur zur Attributpropagierung dienen, sondern auch zur Definition von Bedingungen verwendbar sind. Das ist insbesondere zur Validierung der Attributwerte durch *a priori* Wahrscheinlichkeiten notwendig. Außerdem macht das ebenfalls neu eingeführte Konzept der Guards davon Gebrauch. Guards sind spezielle semantische Regeln und somit einer Produktionsregel zugewiesen. Sie bestimmen die Wahrscheinlichkeit einer Produktionsregel und sind für den Parsingalgorithmus von besonderer Bedeutung, da sie eine Schnittstelle zwischen Grammatik und 3D-Punktwolke realisieren. Darüber hinaus wurde die Attributpropagierung durch Unifikation realisiert. So lässt sich die Identität von Attributen definieren, die erst im Laufe des Rekonstruktionsprozesses mit Werten belegt werden. Nach der Schätzung eines dieser Attribute, werden die übrigen unifiziert und stehen so als Vorwissen für die Rekonstruktion weiterer Objekte zur Verfügung.

Das geometrisch-topologische und semantische Modell wurde auf die Fassadengrammatik abgebildet. Dieses Modell kombiniert sämtliches Vorwissen über Fassaden, so dass es auch zum synthetischen Generieren von Fassaden verwendet werden kann.

In Kapitel 6 wurden schließlich MOSAP und die Fassadengrammatik kombiniert und in den Parsingalgorithmus `parse3d` integriert. Der Algorithmus leitet iterativ Nichtterminale durch Anwenden von Produktionsregeln ab und erzeugt so Ableitungsbäume, die das zu rekonstruierende Objekt repräsentieren. In jeder Iteration wird zunächst das abzuleitende Symbol und dann die anzuwendenden Produktionsregeln bestimmt. Die vorgestellte probabilistische Modellierung ermöglicht die Selektion basierend auf den aus Wahrscheinlichkeitsdichten bestimmten *a priori* Wahrscheinlichkeiten.

Existieren mehrere Regeln mit dem gewählten Symbol auf der linken Seite, so werden durch die Realisierung von beam search die k wahrscheinlichsten Regeln ausgewählt. Aufgrund der datenbasierten Bestimmung dieser Wahrscheinlichkeiten durch Guards, wird deren Bedeutung als Realisierung der Schnittstelle zwischen Grammatik und Daten deutlich. Guards schätzen die Wahrscheinlichkeit der Existenz der von einer Produktionsregel erzeugten Symbole ohne die entsprechenden Objekte exakt zu rekonstruieren. Die Realisierung von Guards wurde am Beispiel der Produktionsregeln erläutert, die einen oder keinen Erker bzw. ein oder kein Fensterraster erzeugen.

Die Anwendung einer Produktionsregel im Parsingalgorithmus entspricht der Rekonstruktion der Objekte, die durch die Rechteseitesymbole repräsentiert sind. Dies ist die zweite Schnittstelle zwischen dem Parser bzw. der Grammatik und der 3D-Punktwolke. Die bei

der Rekonstruktion geschätzten Lage- und Formparameter werden den entsprechenden Symbolen zugewiesen und durch die Unifikation im gesamten Ableitungsbaum kommuniziert. So fließen geometrische Bedingungen aus bereits rekonstruierten Objekten in den weiteren Rekonstruktionsprozess ein.

7.2 Übertragbarkeit

Das hier vorgestellte Konzept zum Parsing von 3D-Punktwolken lässt sich auf andere zu rekonstruierende Objekte sowie andere Beobachtungsdaten übertragen. Der quasi modulare Aufbau geht aus Abbildung 1.1 (S. 3) hervor.

Zur Rekonstruktion anderer Objekte ist zunächst ein geeignetes Modell dieser Objekte in Form einer attributierten Grammatik zu erstellen. Dies schließt die neue Definition der beiden Schnittstellen zwischen Grammatik und den zu interpretierenden Daten ein: Guards (rote Pfeile) und Rekonstruktionsverfahren (blaue Pfeile). Die Notwendigkeit der Anpassung von Guards und Rekonstruktion ergibt sich auch aus deren direkten Zuordnung zur Grammatik. Die Schätzverfahren zur Rekonstruktion der Objekte sind den entsprechenden Symbolen der Grammatik zugewiesen. Denkbar wäre beispielsweise die Adaption einer Grammatik für Dächer zur Interpretation von 3D-Punktwolken aus luftgestütztem Laserscanning.

Die Interpretation anderer Sensordaten wie beispielsweise terrestrischer Bilder von Fassaden ist ebenso möglich. In dem konkreten Beispiel wäre bei ausreichender Anzahl von Bildern die Ableitung einer 3D-Punktwolke mit Multibildverfahren möglich. Wegen der dann identischen Art von Daten sind keine weiteren Modifikation nötig.

Zur Schätzung von Objekten aus Einzelbildern, kann bei identischen Objekten das Modell, also die Grammatik, weiter verwendet werden. Es sind lediglich die Guards sowie die robusten Schätzer anzupassen, da sie die Schnittstelle zwischen Daten und Grammatik realisieren. Änderungen an der Grammatik werden nötig, falls sich auch die Auflösung oder Dimensionalität der zu rekonstruierenden Objekte ändert.

7.3 Ausblick

Diese Arbeit trägt zur Lösung des Problems der automatischen Ableitung von 3D-Stadtmodellen aus Sensordaten bei. Jedoch wird das Problem nicht vollständig gelöst und auch der erbrachte Beitrag wirft weitere Fragen auf. Beides erfordert eine weitere Betrachtung.

Ein wichtiger Teil dieser Arbeit ist die Definition des geometrisch-topologischen sowie des semantischen Modells und die Ableitung der Fassadengrammatik. Für die Modellierung der Realwelt, also die Abstraktion und Formalisierung ist häufig Expertenwissen nötig. Maschinelles Lernen wird jedoch schon vielfach verwendet, um Modelle automatisch aus Beobachtungsdaten zu lernen. Auch das Lernen von Grammatiken bzw. Grammatikregeln für natürliche Sprachen wird bereits eingesetzt. Doch so wie das Parsing von 3D-Punktwolken wegen der unterschiedlichen Repräsentation von Daten und Symbolen schwierig ist, so ist

auch das Lernen von Grammatiken aus 3D-Punktwolke eine Herausforderung. Erste Ansätze hierzu wurden von Dehbi und Plümer (2010) gezeigt.

Das aus den terrestrisch beobachteten Daten abgeleitete umfangreiche Vorwissen spiegelt die hier betrachteten heterogenen Fassaden wieder. Es ist zu prüfen, ob und in welchem Umfang zur Rekonstruktion anderer Objekte weitere Datenerfassung sowie die Ableitung entsprechender Wahrscheinlichkeitsdichten notwendig ist. Ebenso ist zu untersuchen, ob die Vereinigung des Vorwissens zweier Gebäudetypen in beiden Domänen noch zu hinreichend genauen Ergebnissen führt.

Die Rekonstruktion und Interpretation von Fassade realisiert nur einen kleinen Teil der automatischen Erstellung von 3D-Stadt- oder -Gebäudemodellen. Die Konzeption und/ oder Verbesserung von Verfahren zur Rekonstruktion weiterer Objekte wie Dächer, Innenräume oder Verkehrswege und insbesondere die Integration dieser Verfahren zur Erstellung von topologisch korrekten, lückenlosen Modellen ist sicher eine der wesentlichen zukünftigen Herausforderungen auf diesem Bereich. Hierzu ist auch die Integration von Objekten unterschiedlicher Quellen zu zählen.

A Häufigkeitsverteilungen und Wahrscheinlichkeitsdichten

Die Verwendung von quantifiziertem Vorwissen in Form von Wahrscheinlichkeitsdichten spielt in dieser Arbeit eine zentrale Rolle. In diesem Kapitel werden daher die aus Punktwolken und Bildern abgeleiteten Daten (vgl. Abschnitt 3.4) präsentiert. Die in orange dargestellten Dichten wurden durch Kerndichteschätzer geschätzt.

A.1 Erker

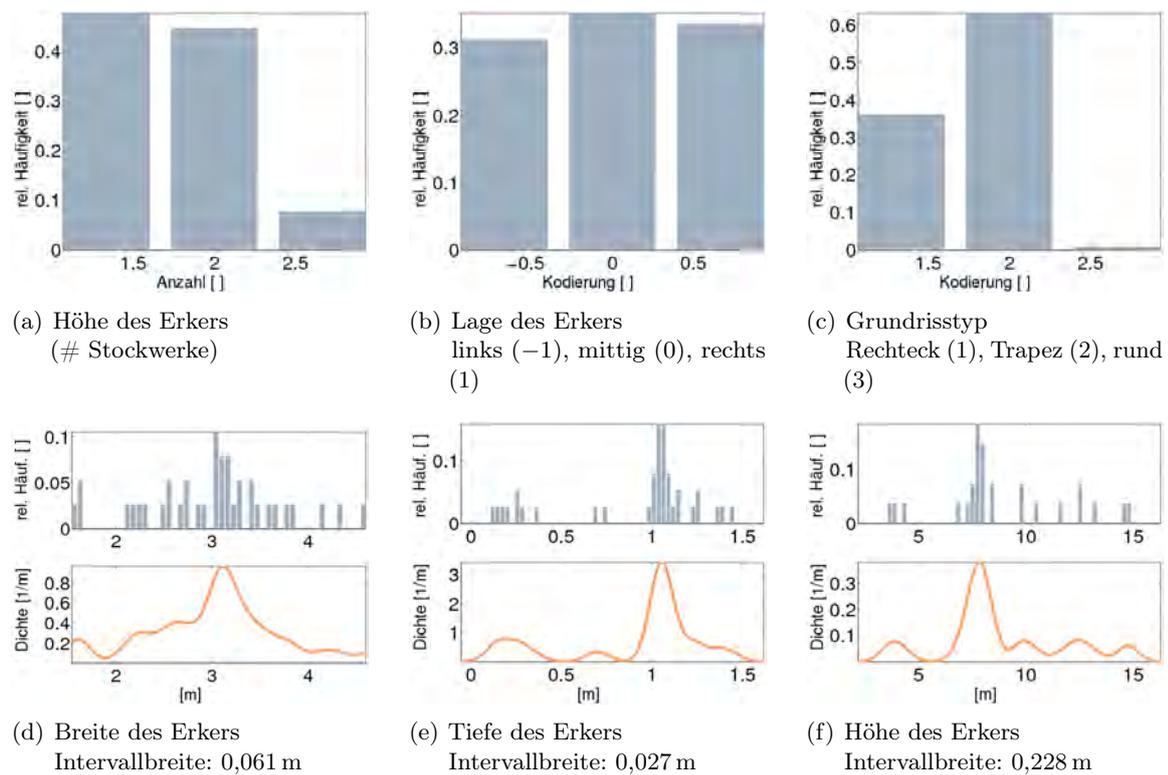


Abbildung A.1: Histogramme(blau) und Wahrscheinlichkeitsdichte (orange) des Vorwissens über Erker

A.2 Gebäude

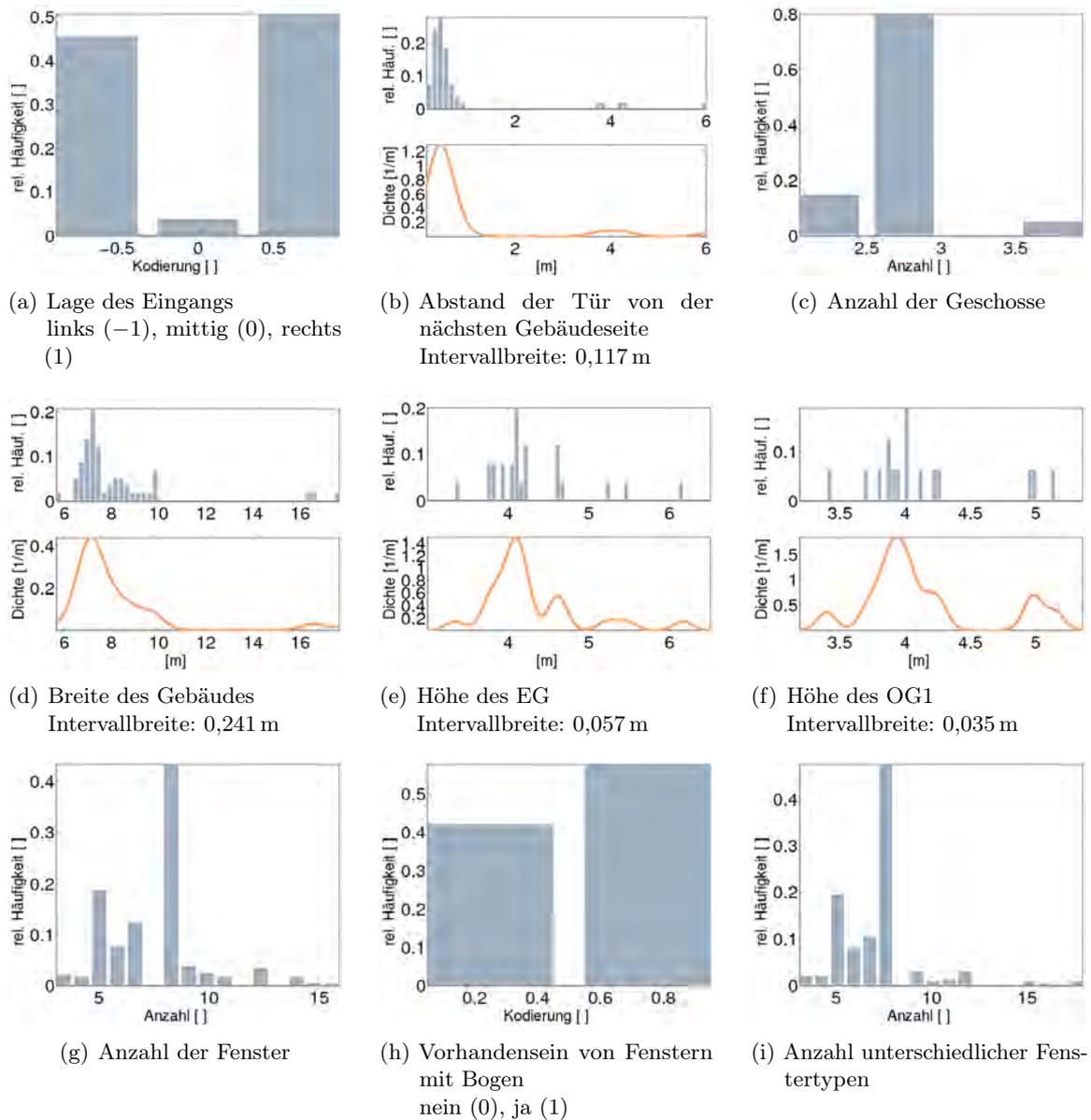


Abbildung A.2: Histogramme(blau) und Wahrscheinlichkeitsdichte (orange) des Vorwissens über Gebäude

A.3 Türen

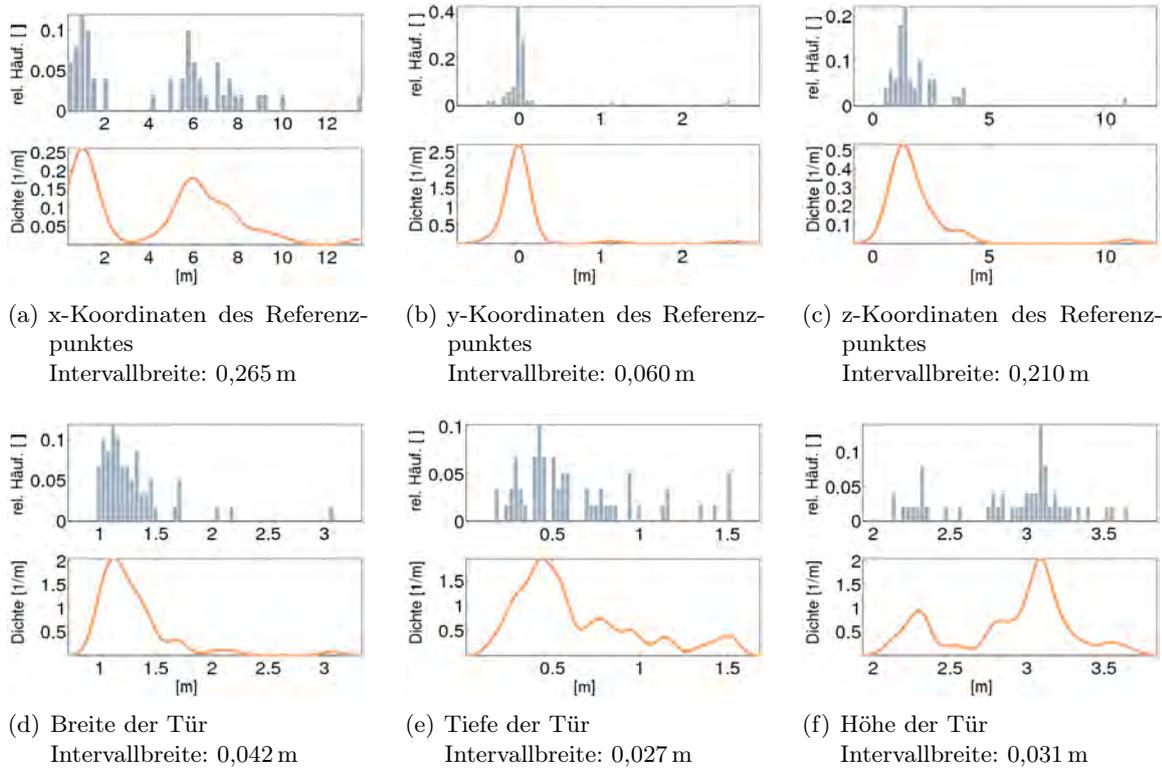


Abbildung A.3: Histogramme(blau) und Wahrscheinlichkeitsdichte (orange) des Vorwissens über Türen

A.4 Treppen

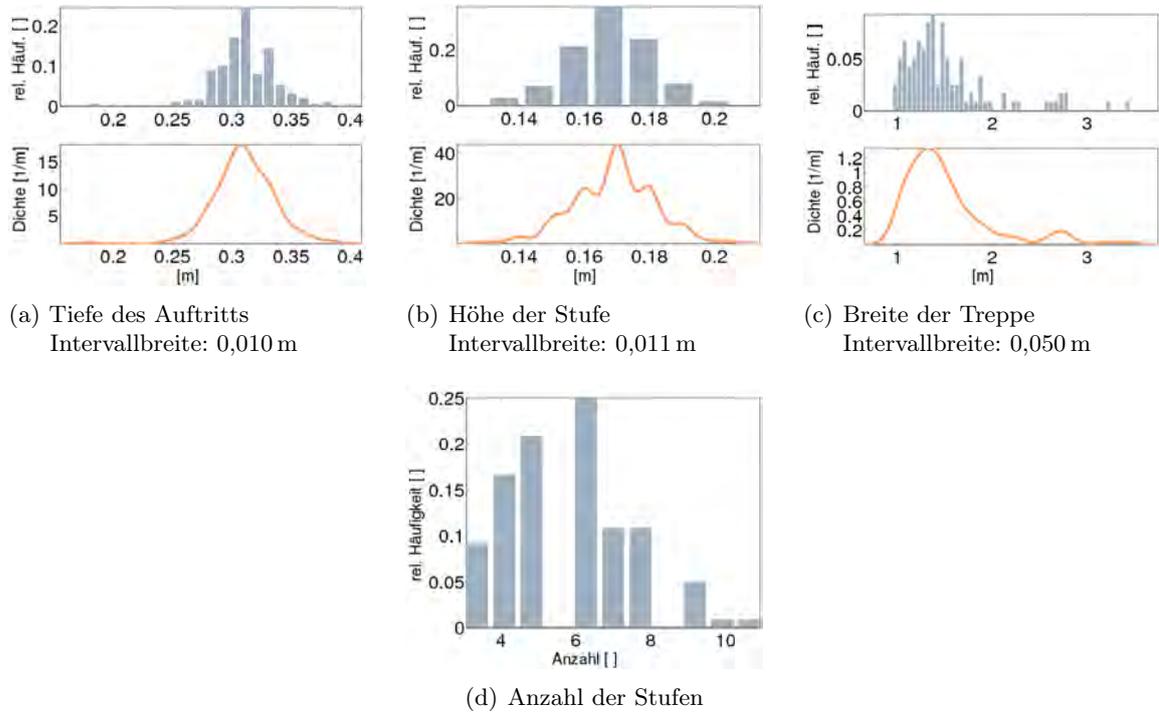
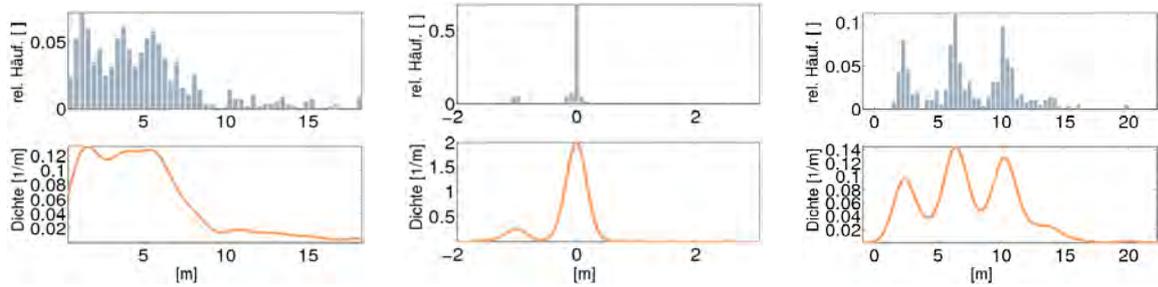


Abbildung A.4: Histogramme(blau) und Wahrscheinlichkeitsdichte (orange) des Vorwissens über Treppen

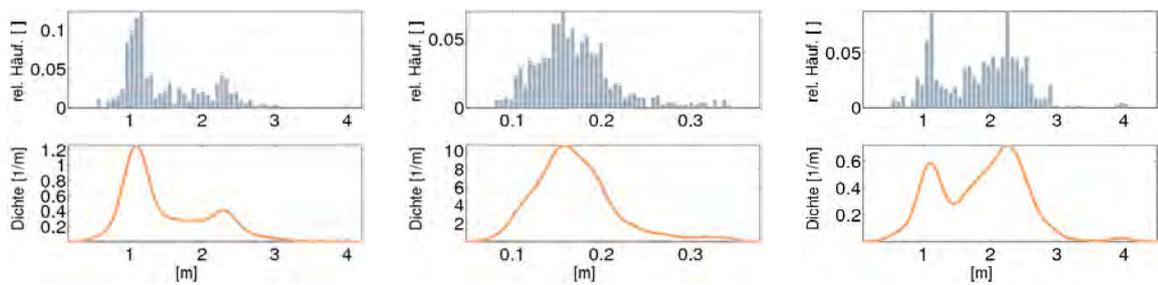
A.5 Fenster



(a) x-Koordinaten des Referenzpunktes
Intervallbreite: 0,358 m

(b) y-Koordinaten des Referenzpunktes
Intervallbreite: 0,082 m

(c) z-Koordinaten des Referenzpunktes
Intervallbreite: 0,373 m



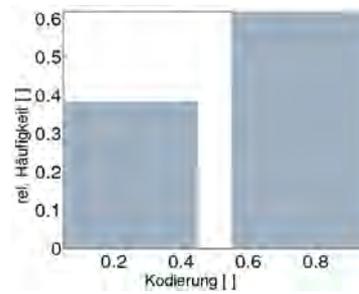
(d) Breite des Fensters
Intervallbreite: 0,065 m

(e) Tiefe des Fensters
Intervallbreite: 0,005 m

(f) Höhe des Fensters
Intervallbreite: 0,071 m

Abbildung A.5: Histogramme (blau) und Wahrscheinlichkeitsdichte (orange) des Vorwissens über Fenster

A.6 Balkone



(a) Vorhandensein eines Balkons
nein (0), ja (1)

Abbildung A.6: Histogramme (blau) und Wahrscheinlichkeitsdichte (orange) des Vorwissens über Balkone

B Terrestrische 3D-Punktwolken

In diesem Kapitel werden beispielhaft einige der erfassten 3D-Punktwolken von Gebäudefassaden der Bonner Südstadt gezeigt (vgl. Abschnitt 2.1.1). Dargestellt ist jeweils eine zufällig gewählte Teilmenge von 10% der Originalpunktwolke. Alle Punktwolken wurden automatisch in das in Abschnitt 2.1.1 beschriebenen Koordinatensystem transformiert.

B.1 Terrestrische 3D-Punktwolken

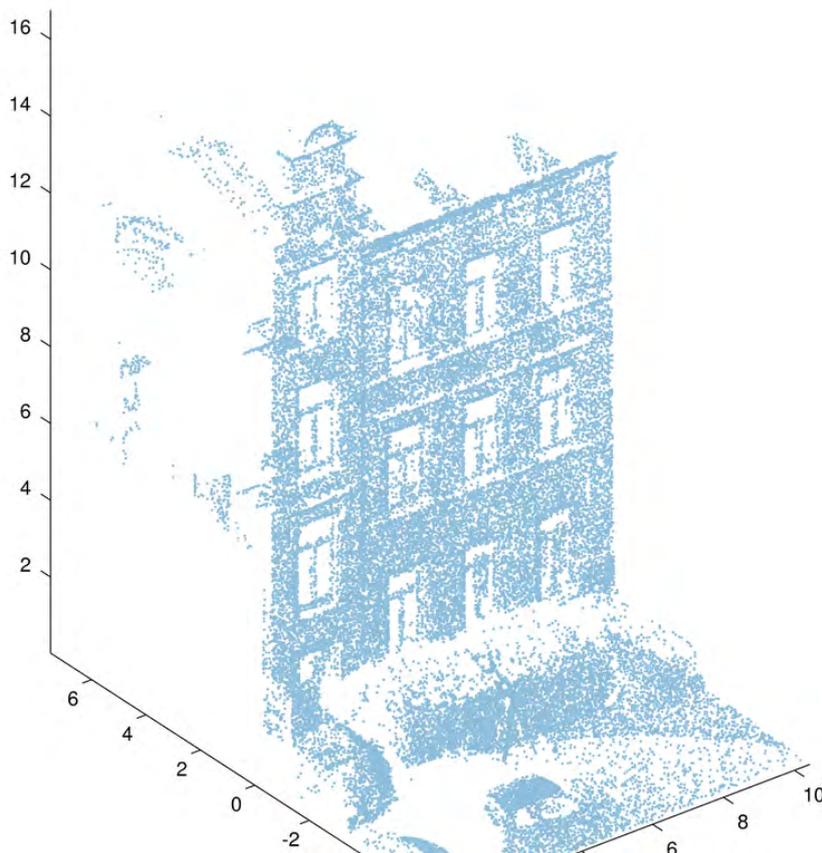


Abbildung B.1: Teilmenge (10%) der 3D-Punktwolke

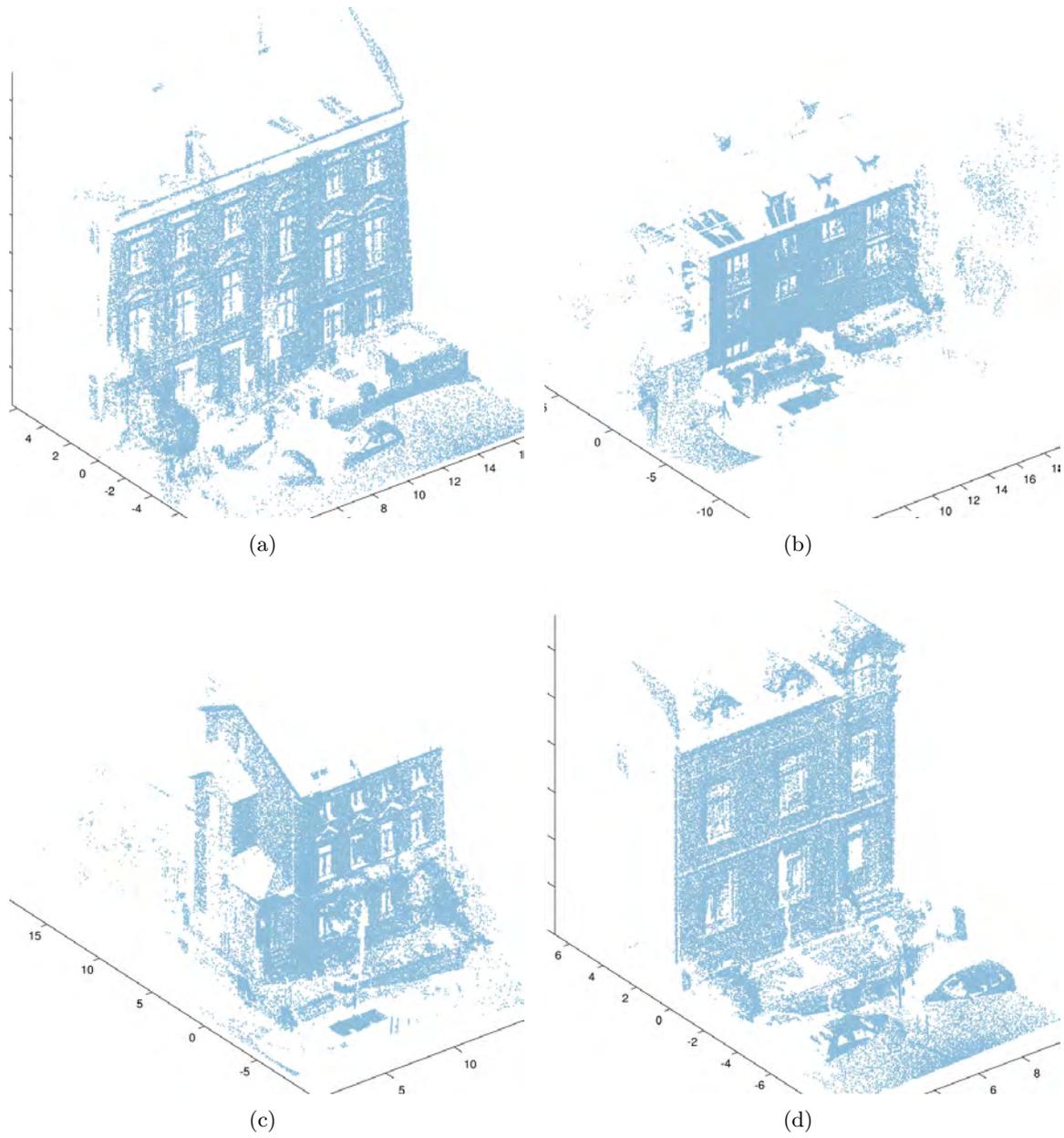


Abbildung B.2: Teilmenge (10%) der 3D-Punktwolke

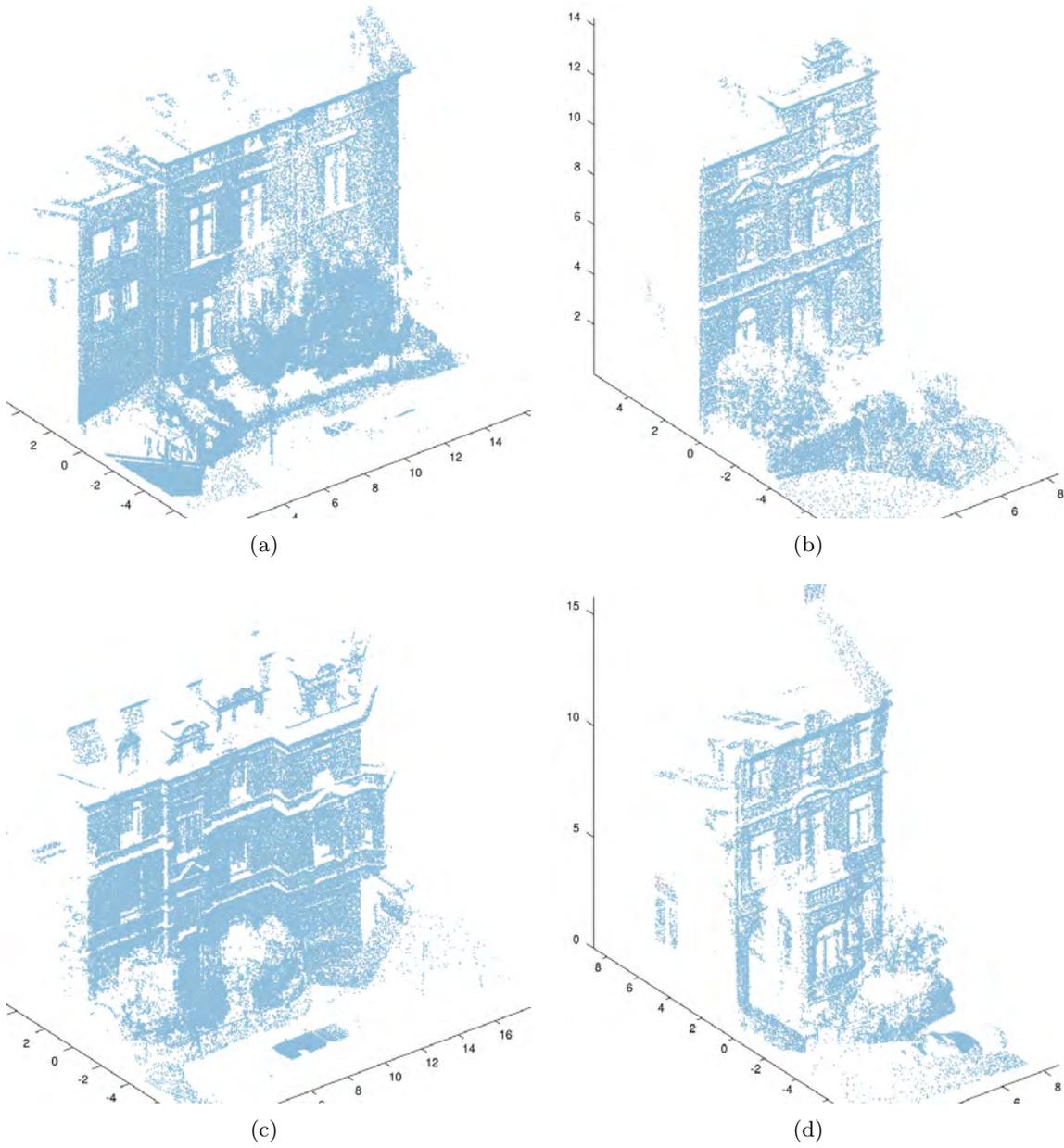


Abbildung B.3: Teilmenge (10%) der 3D-Punktwolke

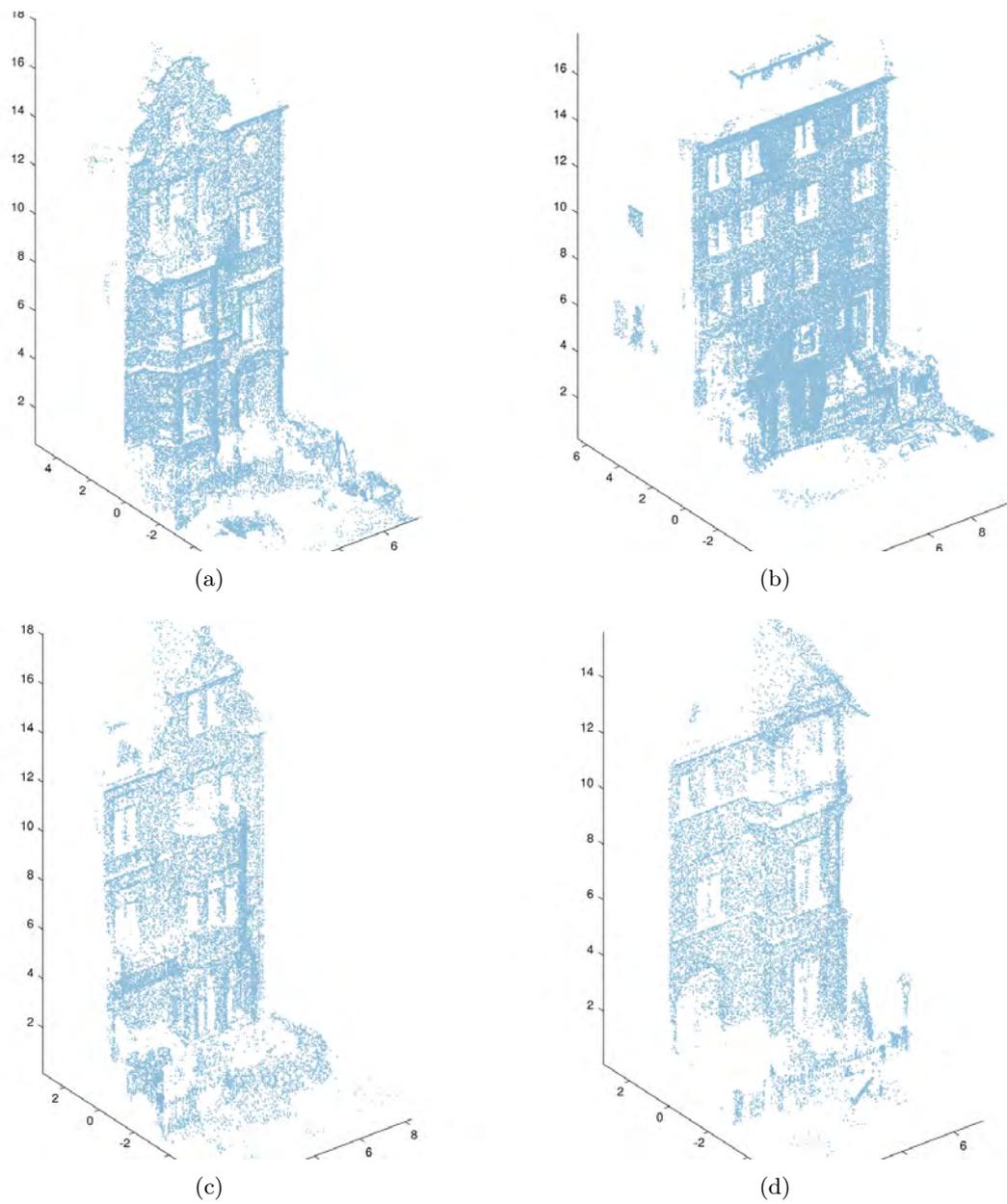


Abbildung B.4: Teilmenge (10%) der 3D-Punktwolke

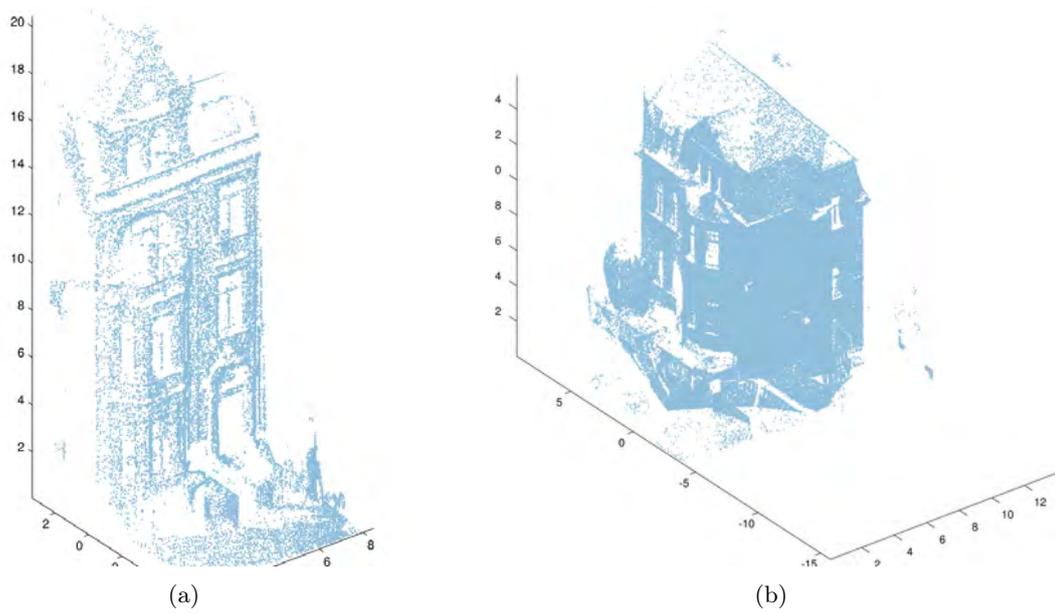


Abbildung B.5: Teilmenge (10%) der 3D-Punktwolke

C Terrestrische Bilder von Fassaden

Im Folgenden wird ein Überblick über die verwendeten terrestrischen Fassadenbilder gegeben. Die Bilder wurden mit den kalibrierten, digitalen Spiegelreflexkameras Nikon D700 (20 mm Festbrennweite) und Canon 350D (18 mm bis 55 mm, kalibriert und fixiert auf 18 mm) aufgenommen und mit der Software *MeasureFacade* (vgl. Abschnitt 2.1.2 sowie Anhang D) entzerrt und rektifiziert.

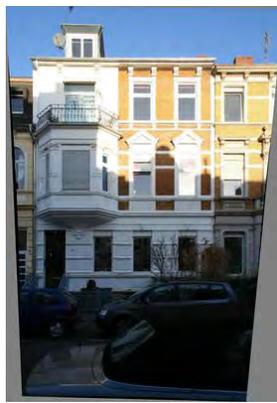
C.1 Terrestrische Bilder von Fassaden



Abbildung C.1: Entzerrte und rektifizierte Fassadenbilder



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)



(i)



(j)



(k)



(l)

Abbildung C.2: Entzerrte und rektifizierte Fassadenbilder

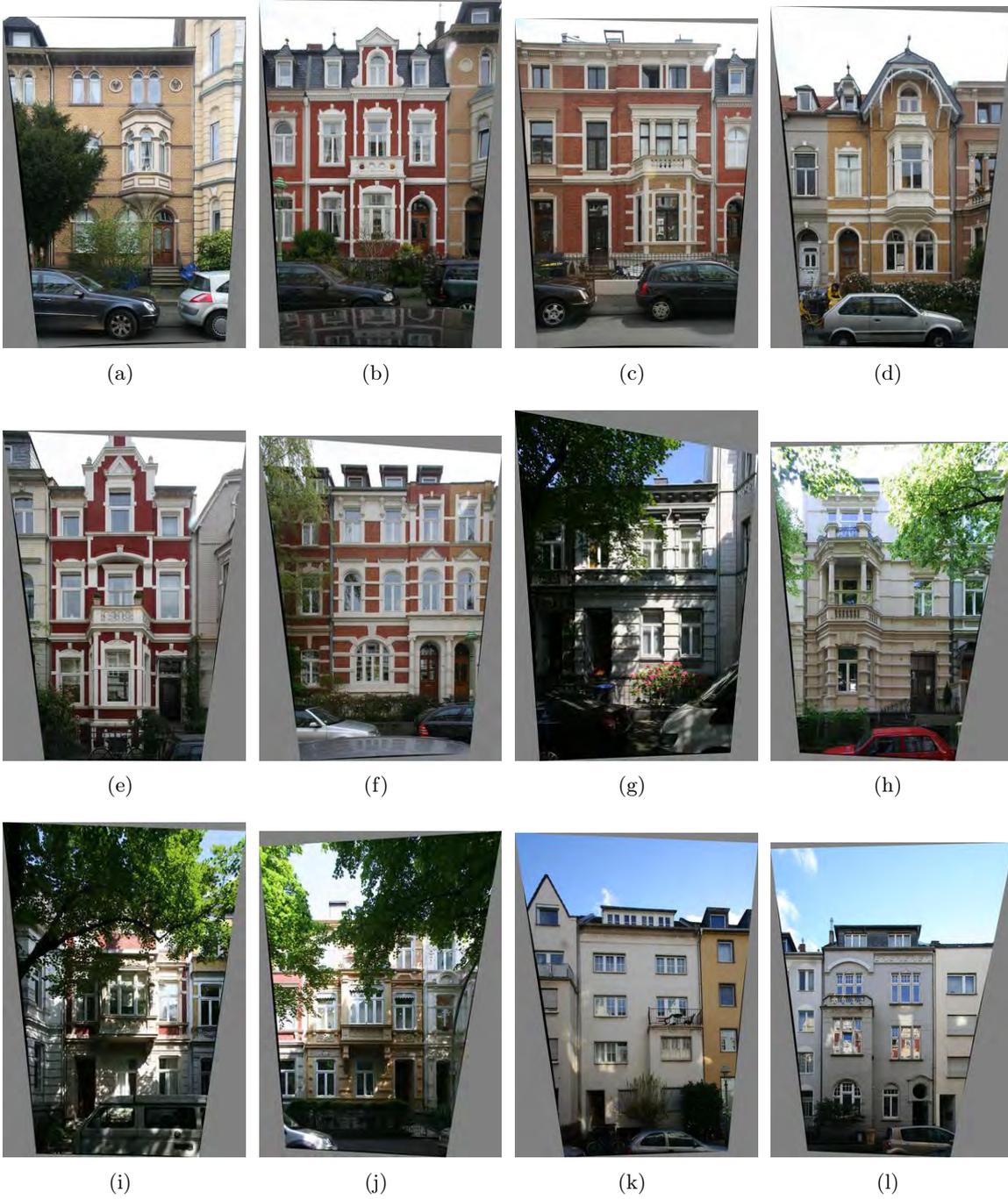


Abbildung C.3: Entzerrte und rektifizierte Fassadenbilder

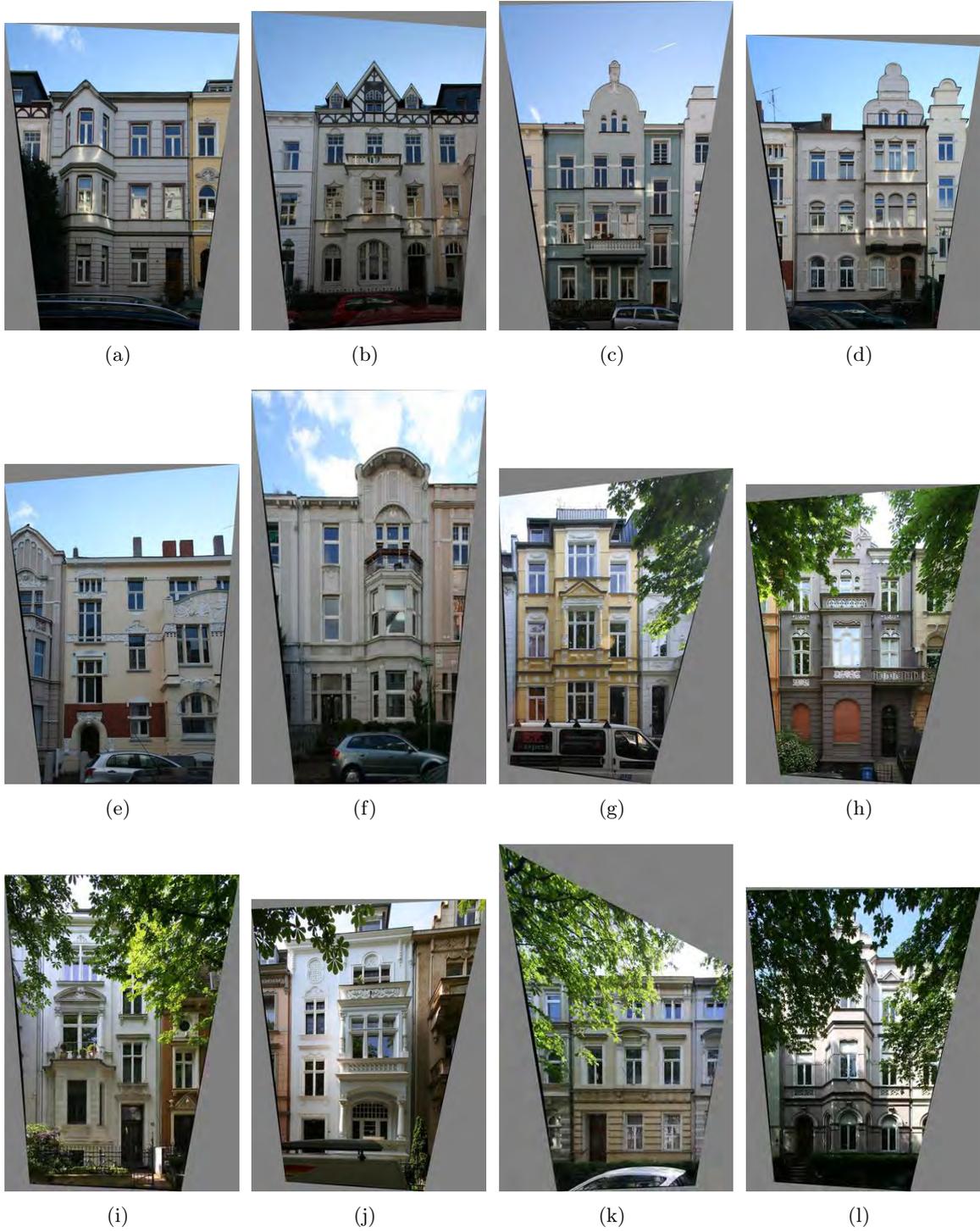


Abbildung C.4: Entzerrte und rektifizierte Fassadenbilder



Abbildung C.5: Entzerzte und rektifizierte Fassadenbilder

D Das Programm *MeasureFacade*

Das in Matlab implementierte Werkzeug *MeasureFacade* (Staat und Schmittwilken, 2010) wurde entwickelt, um die Lage- und Formparameter von Objekte in Bildern und 3D-Punktwolke zu messen. Da der Fokus auf der Erfassung von Gebäudeteilen und dem Aufbau einer Datenbank der entsprechenden Parameter liegt, wurde der automatischer Export der Messergebnisse in eine Textdatei implementiert. Die Daten werden zusammen mit einer ID des Datensatzes gespeichert, so dass sie diesem wieder zugeordnet werden können – beispielsweise zur automatischen Validierung der Ergebnisse automatischer Rekonstruktion.

MeasureFacade ist unter <http://www.ikg.uni-bonn.de/forschung/projektarchiv/measurefacade.html> frei verfügbar.

D.1 Funktionalität

Auf eine umfangreiche grafische Oberfläche wurde verzichtet und die Steuerung der Funktionalität durch Tastatureingaben realisiert.

D.1.1 Datenaufbereitung

MeasureFacade bietet zur Aufbereitung der Daten Funktionalitäten zur Entzerrung, Rektifizierung und Skalierung von Bildern sowie zum automatischen Orientieren der 3D-Punktwolken entsprechend der in Abschnitt 2.1.1 aufgezeigten Orientierung.

Zur Entzerrung der Bilder wird die Funktion `ori_tccApplyLut` der Professur für Photogrammetrie, der Universität Bonn und die entsprechenden Kalibrierdaten der Kameras verwendet.

Die Rektifizierung wird durch die Adaption von Funktionen des Programms *Annotation Tool* (Korč und Schneider, 2007) realisiert. Diese interaktive Funktion erfordert die Definition von zwei Paaren paralleler Liniensegmente vom Benutzer.

Durch das Messen einer Strecke an der realen Gebäudefassade wie beispielsweise der Breite des Eingangs oder eines Fenster, kann das Bild skaliert werden. Hierzu wird die entsprechende Strecke im Bild definiert und der Skalierungsfaktor automatisch bestimmt. Somit werden nicht länger relative Pixel-Maße, sondern metrische Distanzen ermittelt.

D.1.2 Vermessen von Objekten

Wegen der zumeist orthogonalen Objekte geschieht die Vermessung durch das Positionieren und Skalieren eines achsparallelen Rechtecks im Bild (Abbildung D.1). Für das Vermessen von Punktwolken wird die Projektion in die xy - sowie xz -Ebene verwendet, was dem Positionieren und Skalieren eines Quader gleichkommt. Durch die zuvor genannte Aufbereitung der Daten sind alle Objekte parallel zu den Koordinatenachsen und somit gut durch Rechtecke bzw. Quader zu approximieren.

Messen in in Bildern

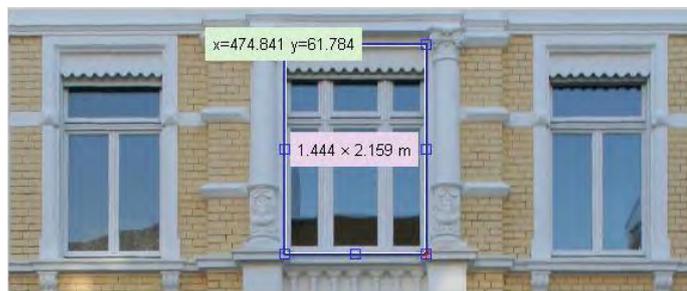


Abbildung D.1: Messen eines Fensters in einem Bild.

In Bildern können neben Rechtecken auch beliebige Liniensegmente gemessen werden. Dies ist in Abbildung D.2 dargestellt. Ein Export der gemessenen Liniensegmente steht jedoch nicht zur Verfügung.



Abbildung D.2: Messen von Distanzen in einem Bild

Messen in 3D-Punktwolken

Zum Vermessen von Objekten in 3D-Punktwolken wird zwischen der Projektion der Punktwolke in die xy -Ebene (lila Punkte, Abbildung D.3) sowie die xz -Ebene (grüne Punkte, Abbildung D.4) umgeschaltet. In jeder Ansicht wird wie beim Messen in Bildern ein Rechteck an das entsprechende Objekt angepasst. Die Daten in der gemeinsamen Koordinatenrichtung also die x -Koordinate des Referenzpunktes sowie die Breite des Objekts werden in die jeweils andre Ansicht übernommen.

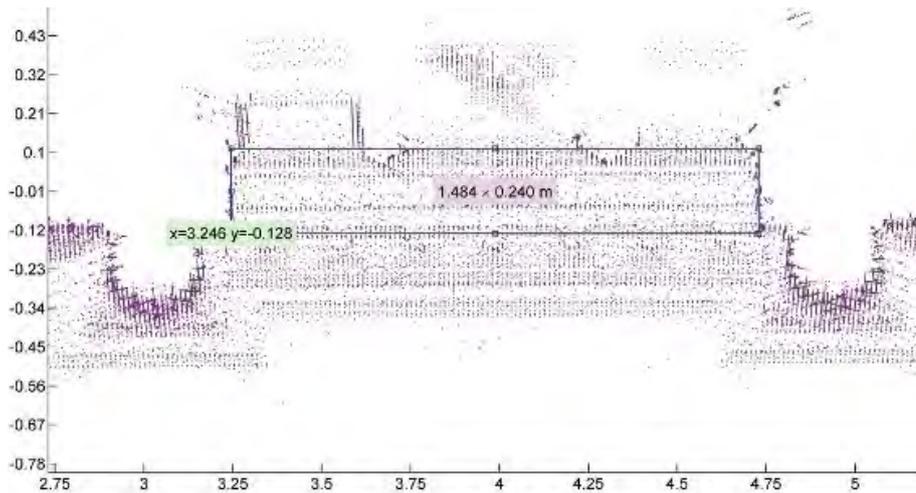


Abbildung D.3: Messen von Fenstern in einer 3D-Punktwolke: xy -Projektion

D.1.3 Annotation

Neben der Vermessung von Daten in Bildern und 3D-Punktwolken können die durch das Rechteck markierten Bereiche des Bildes oder die durch den Quader definierte Teilmenge der 3D-Punktwolken mit einem Label (Attribut) versehen werden. Dazu werden für Bilder die Lage und Größe der Rechtecke mit dem entsprechenden Label in einer Textdatei gespeichert. Die Datendateien der Punktwolken (CSV-Format, Comma Separated Values) werden um eine Spalte für die Label erweitert.

Diese annotierten Datensätze können beispielsweise als Trainingsdatensätze für überwachte Lernverfahren (vgl. Mitchell, 1997) verwendet werden

D.1.4 Export von Teilmengen von 3D-Punktwolken

MeasureFacade bietet die Möglichkeit die durch einen Quader definierte Teilmenge von 3D-Punktwolken in eigene Datendateien zu exportieren.

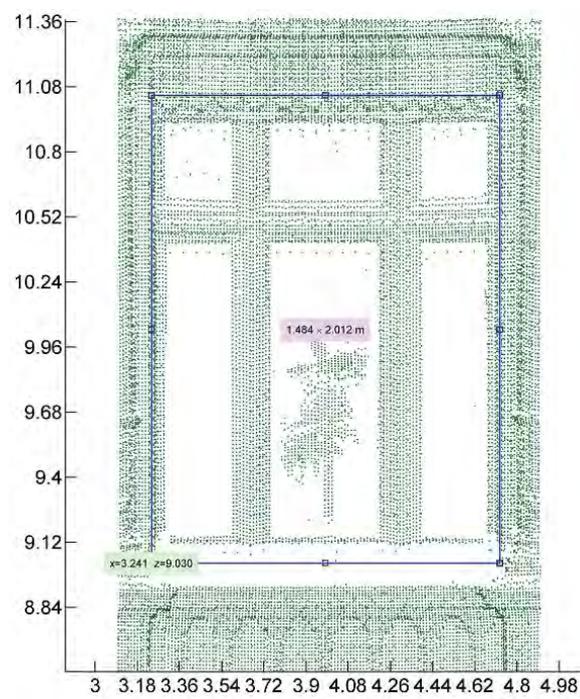


Abbildung D.4: Messen von Fenstern in einer 3D-Punktwolke: xz-Projektion

E Das Programm XG^{ep}

Zur Prozessierung von attributierten Geometrie-Grammatiken stellen Behmann et al. (2010) die Applikation XG^{ep} (XML Based Grammar Editing and Processing) vor, die im Internet unter <http://www.ikg.uni-bonn.de/forschung/xgep> frei verfügbar ist. Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über das Konzept und die Implementierung von XG^{ep} gegeben.



Abbildung E.1: Mit XG^{ep} synthetisch generierter Straßenzug

XG^{ep} liegt ein Schema für die Extensible Markup Language (XML, Bray et al., 2008) zugrunde, das die XML-Syntax zur Definition von Grammatiken durch Symbole, Attribute, Produktionsregeln und semantische Regeln beschreibt. Das Schema gibt neben der Syntax für Grammatiken auch die Kodierung von Ableitungsbäumen und abgeleiteten Worten vor. Behmann et al. stellen die Java-Implementierung eines Prozessors vor, der in XML kodierte Grammatiken einlesen und ableiten kann. Zusätzlich steht eine grafische Benutzeroberfläche zur Definition und Prozessierung von attributierten Grammatiken zur Verfügung.

Die wesentlichen Merkmalen von XG^{ep} sind im Folgenden zusammengestellt

- Offene Schnittstellen und generische Konzepte zur Auswahl von Produktionsregeln und abzuleitenden Symbolen. So können beliebige Konzepte wie beispielsweise die in parse3d (vgl. Abschnitt 6.1) erläuterten Selektionsmethoden implementiert werden.
- Definition von Gruppenattributen zur Vereinfachung der Grammatikdefinition sowie der Kapselung von semantischen Regeln. In einem Gruppenattribut werden mehrere Attribute zusammengefasst. Semantische Regeln, die solche Gruppenattribute verwenden, werden als XSL-Transformationen (XSLT, Clark, 1999) realisiert, die erst beim Ausführen der Grammatik mit XG^{ep} angewendet wird. Dies wird beispielsweise zur Definition von Referenzpunkten im Attribut `auftritt.pkt` und entsprechender Transformationen `trans()` wie in Listing 5.3 (S. 90) gezeigt verwendet.
- Geometrische Instanziierung. Den Terminalsymbolen können in XG^{ep} geometrische Primitive zugewiesen werden. Durch ein generisches Mapping werden die Attribute und die Parameter der Primitive aufeinander abgebildet. So lassen sich Ableitungsbäume in visualisierbare 3D-Formate wie wie VRML (International Organization for Standardization, 2004), X3D (International Organization for Standardization, 2009) oder

GML (Portele, 2007) überführen. Wird die Semantik des Ableitungsbaum ebenfalls interpretiert, so kann diese zusammen mit der GML-Beschreibung der Geometrie in das CityGML Format überführt werden.

Im folgenden werden einige Screenshots der Benutzeroberfläche von XGep^{ep} gezeigt.

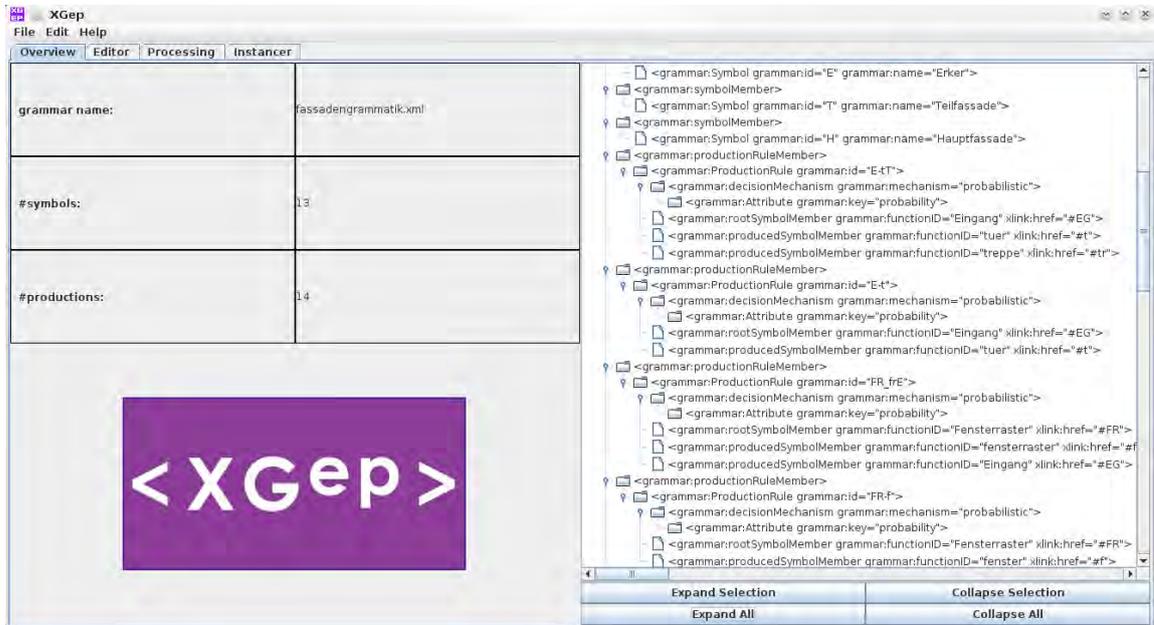


Abbildung E.2: Übersicht über die geladene Grammatik

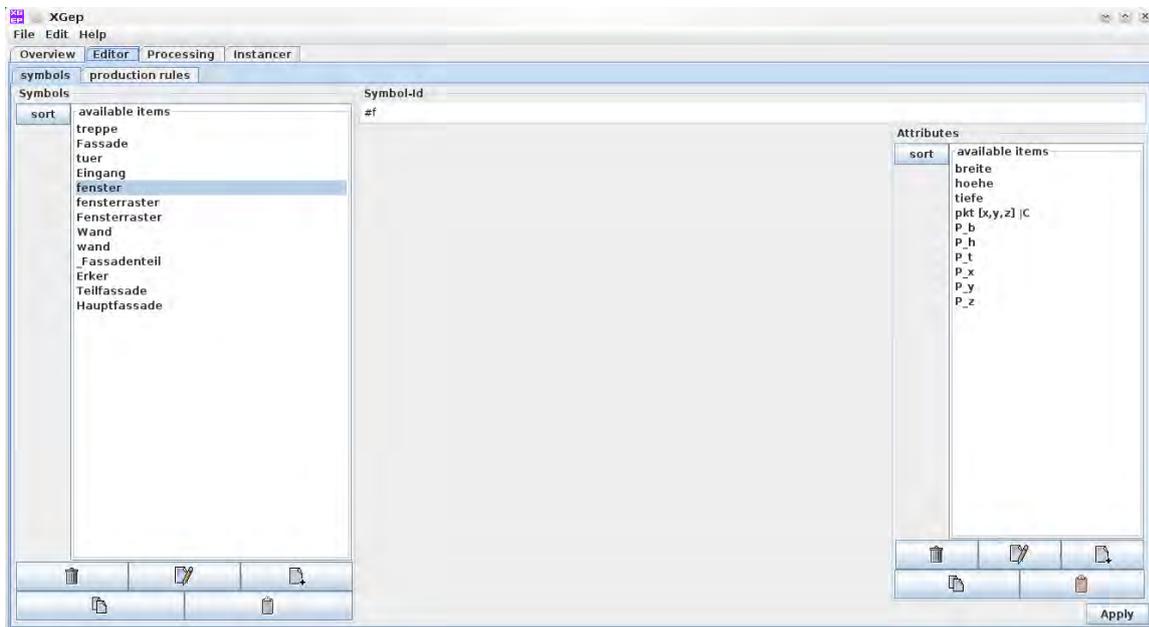


Abbildung E.3: Editieren der Symbole und Attribute

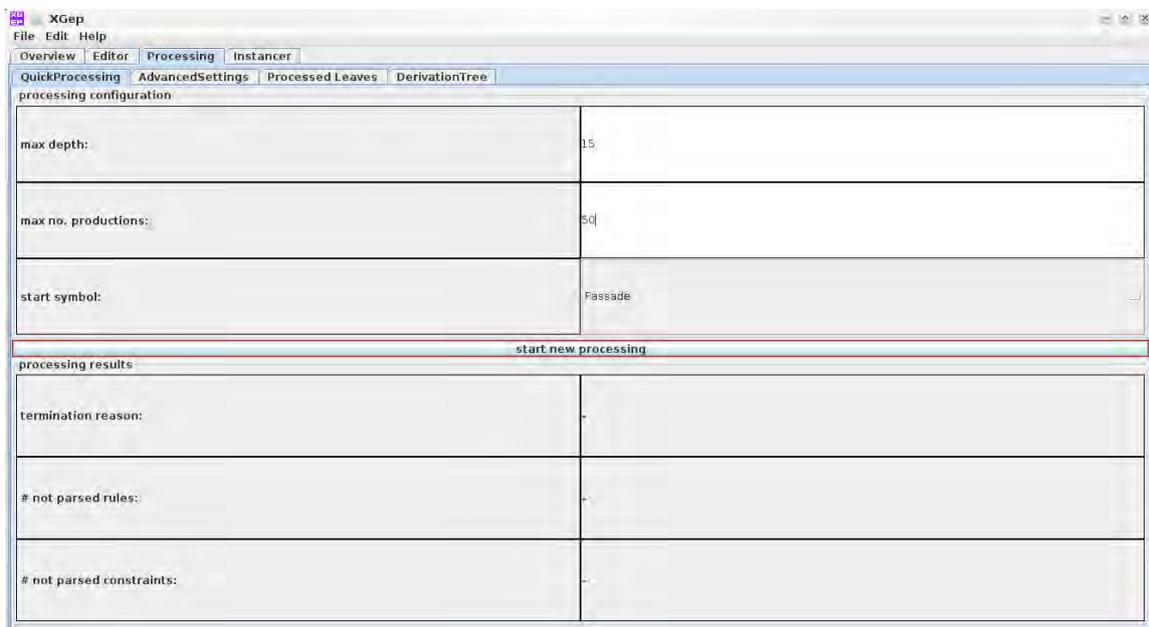


Abbildung E.4: Prozessieren der geladenen Grammatik

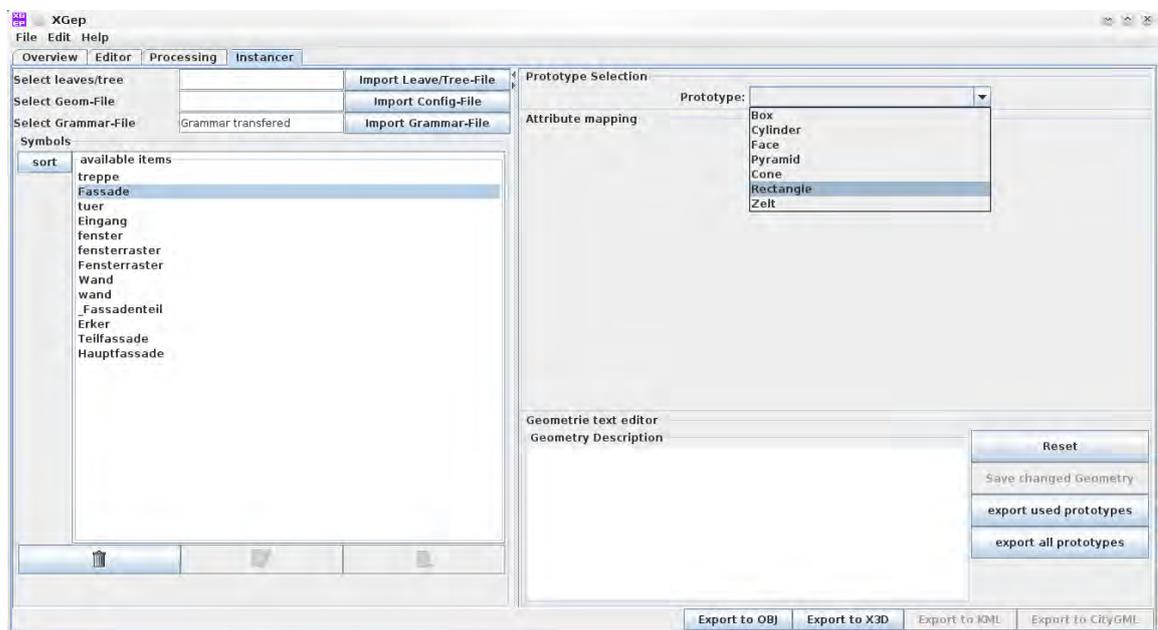


Abbildung E.5: Geometrische Instanziierung eines Ableitungsbaums

Literaturverzeichnis

- Abelson, Harold*, und *Andrea diSessa*, 1986: *Turtle Geometry: The Computer as a Medium for Exploring Mathematics (Artificial Intelligence)*. The MIT Press.
- AdV*, 2008: *Dokumentation zur Modellierung der Geoinformationen des amtlichen Vermessungswesens (GeoInfoDok) – ALKIS-Objektartenkatalog*.
- Aho, Alfred V.*, *Ravi Sethi*, und *Jeffrey D. Ullmann*, 1999: *Compilerbau Teil 1*. Oldenbourg.
- Aliaga, Daniel G.*, *Paul A. Rosen*, und *Daniel R. Bekins*, 2007: *Style Grammars for Interactive Visualization of Architecture*. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 13: 786 – 797.
- Alsweis, M.*, und *O. Deussen*, 2005: *Modeling and Visualization of symmetric and asymmetric plant competition*. In: *Pierre Poulin* und *Eric Galin* (Hg.), *Proceedings of Eurographics 2005 Workshop on Natural Phenomena*, 30. August 2005, Dublin, Ireland. Eurographics Association, S. 83 – 88.
- Apt, Krzysztof*, 2006: *Principles of Constrained Programming*. Cambridge University Press, UK.
- Apt, Krzysztof R.*, und *Mark Wallace*, 2007: *Constraint Logic Programming Using ECLiPSe*. Cambridge University Press.
- Baillard, C.*, und *A. Zisserman*, 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.
- Baker, James E.*, 1987: *Reducing bias and inefficiency in the selection algorithm*. In: *Proceedings of the Second International Conference on Genetic Algorithms on Genetic algorithms and their application*. Hillsdale, NJ, USA: L. Erlbaum Associates Inc., S. 14 – 21.
- Barber, David*, *Jon Mills*, und *Sarah Smith-Voysey*, 2008: *Geometric validation of a ground-based mobile laser scanning system*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 63: 128 – 141.
- Baus, Ursula*, und *Karl J. Habermann*, 2006: *Wendel- und Spindeltreppen*. Deutsche Verlags-Anstalt München.
- Becker, Susanne*, 2009: *Generation and application of rules for quality dependent façade reconstruction*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64: 640 – 653.

- Becker, Susanne*, 2010: Automatische Ableitung und Anwendung von Regeln für die Rekonstruktion von Fassaden aus heterogenen Sensordaten. Dissertation, Universität Stuttgart.
- Becker, Thomas, Claus Nagel*, und *Thomas H. Kolbe*, 2008: A Multilayered Space-Event Model for Navigation in Indoor Spaces. In: *Jiyeong Lee* und *Sisi Zlatanova* (Hg.), Proceedings of the 3rd International Workshop on 3D Geo-Information, Seoul, Korea. S. 61 – 77.
- Behmann, Jan, Dirk Dörschlag*, und *Jörg Schmittwilken*, 2010: XGep - XML basiertes Editieren und Prozessieren formaler Grammatiken. In: Tagungsband des Entwicklerforums Geodäsie und Geoinformationstechnik, November 2010, Berlin.
- Benoudjit, Nabil, Cédric Archambeau, Amaury Lendasse, John Lee*, und *Michel Verleysen*, 2002: Width optimization of the Gaussian kernels in Radial Basis Function Networks. In: Proceedings of European Symposium on Artificial Neural Networks (ESANN 2002), Bruges, Belgium, 24-26 April 2002. S. 425 – 432.
- Bentley, Jon Louis*, 1975: Multidimensional binary search trees used for associative searching. Communications of the ACM 18: 509 – 517.
- Beraldin, J.-Angelo, François Blais*, und *Uwe Lohr*, 2010: Airborne and Terrestrial Laser Scanning, Kap. 1: Laser Scanning Technology. CRC Press, S. 1 – 42.
- Bishop, Christopher M.*, 2006: Pattern Recognition and Machine Learning. Springer.
- Blondel, François*, 1683: Cours d'architecture. Blondel, Mortier Paris.
- Boulaassal, H., T. Landes*, und *P. Grussenmeyer*, 2008: Automatic Extraction of Planar Clusters and their Contours on Building Façades Recorded by Terrestrial Laser Scanner. In: Proceedings of 14th International Conference on Virtual Systems and MultiMedia (VSMM), Limassol, Cyprus, October 20th - 25th, 2008. S. 8 – 15.
- Boulaassal, Hakim, Christine Chevrier*, und *Tania Landes*, 2010: From Laser Data to Parametric Models: Towards an Automatic Method for Building Façade Modelling. In: Proceedings of Digital Heritage - Third International Conference, EuroMed 2010, Lemessos, Cyprus, November 8-13, 2010., Lecture Notes in Computer Science. Springer, S. 42 – 55.
- Bray, Tim, Jean Paoli, C. M. Sperberg-McQueen, Eve Maler*, und *François Yergeau* (Hg.), 2008: Extensible Markup Language (XML) 1.0 (Fifth Edition). W3C.
- Brenner, Claus*, 2010: Airborne and Terrestrial Laser Scanning, Kap. 5: Building Extraction. CRC Press, S. 169 – 212.
- Brenner, Claus*, und *Norbert Haala*, 1998: Rapid acquisition of virtual reality city models from multiple data sources. In: Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium "Real-Time Imaging and Dynamic Analysis", Hakodate, Japan, 2-5 June, Bd. 32 von *IAPRS*. ISPRS, S. 323 – 330.
- Brown, Sheldon, Kristen Kho, Kwangyoon Lee*, und *Erik Hill*, 2009: Accelerating the scalable city. *Concurr. Comput. : Pract. Exper.* 21: 2187 – 2198.

- Cagdas, G*, 1996: A shape grammar: the language of traditional Turkish houses. *Environment and Planning B: Planning and Design* 23: 443 – 464.
- Chang, Dempsey, Laurence Dooley, und Juhani E. Tuovinen*, 2002: Gestalt theory in visual screen design: a new look at an old subject. In: *Proceedings of the Seventh world conference on computers in education conference on Computers in education: Australian topics - Volume 8, CRPIT '02*. Australian Computer Society, Inc., S. 5 – 12.
- Chau, H. H., X. Chen, A. McKay, und A. de Pennington*, 2004: Evaluation of a 3D shape grammar implementation. In: *Proceedings of First International Conference on Design Computing and Cognition (DCC'04)*, 19-21 July 2004, Cambridge, USA.
- Chiou, S-C, und R Krishnamurti*, 1995: The grammar of Taiwanese traditional vernacular dwellings. *Environment and Planning B: Planning and Design* 22: 689 – 720.
- Chomsky, Noam*, 1955: Logical syntax and semantics: Their linguistic relevance. *Language* 31: 36 – 45.
- Chomsky, Noam*, 1956: Three models for the description of language. *Information Theory, IEEE Transactions* 2: 113 – 124.
- Clark, James (Hg.)*, 1999: *XSL Transformations (XSLT) Version 1.0*. W3C.
- Cormen, Thomas H., Charles E. Leiserson, Ronald L. Rivest, und Clifford Stein*, 2009: *Introduction to Algorithms*. MIT Press, 2. Aufl.
- Dehbi, Youness, und Lutz Plümer*, 2010: Learning grammar rules of building parts from precise models and noisy observations. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 66: 166 – 176.
- Deussen, Oliver, Pat Hanrahan, Bernd Lintermann, Radomír Mech, Matt Pharr, und Przemyslaw Prusinkiewicz*, 1998: Realistic Modeling and Rendering of Plant Ecosystems. In: *Proceedings of the ACM SIGGRAPH 1998*. S. 275 – 286.
- Deutsches Institut für Normung e.V.*, 2000: *DIN 18065 - Gebäudetreppen*.
- Dörschlag, Dirk, Gröger Gerhard, und L. Plümer*, 2008: Über die schrittweise Erstellung und Verfeinerung von Modellhypothesen für Gebäude. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation* 3/2008: 157 – 164.
- Downing, F, und U Flemming*, 1981: The bungalows of Buffalo. *Environment and Planning B: Planning and Design* 8: 269 – 293.
- Duarte, José P., João M. Rocha, und Gonçalo Ducla Soares*, 2007: Unveiling the structure of the Marrakech Medina: A shape grammar and an interpreter for generating urban form. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing* 21: 317 – 349.
- Duarte, José Pinto*, 2002: *Malagueira Grammar – towards a tool for customizing Alvaro Siza's mass houses at Malagueira*. Dissertation, MIT School of Architecture and Planning.

- Duda, Richard O., und Peter E. Hart, 1972: Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures. *Communications of the ACM* 15: 11 – 15.
- Ehrenfels, Christian von, 1890: Über Gestaltqualitäten. *Vierteljahrsschrift für wissenschaftliche Philosophie* 14: 249 – 292.
- Ester, Martin, Hans-Peter Kriegel, Jörg Sander, und Xiaowei Xu, 1996: A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise. In: *Proceedings of 2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-96)*. S. 226 – 231.
- Fischer, A., T.H. Kolbe, F. Lang, A.B. Cremers, W. Forstner, L. Pluemer, und V. Steinhage, 1998: Extracting Buildings from Aerial Images Using Hierarchical Aggregation in 2D and 3D. *Computer Vision and Image Understanding* 72: 185 – 203.
- Fischer, Heinz-Martin, Hanns Freymuth, Martin Häußel, Richard Jenisch, Ekkehard Richter, und Martin Stohrer, 2002: *Lehrbuch der Bauphysik*. Vieweg+Teubner Verlag.
- Fischler, Martin A., und Robert C. Bolles, 1981: Random sample consensus: a paradigm for model fitting with application to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM* 24: 381 – 395.
- Flemming, U., 1987: More than the sum of parts: the grammar of Queen Anne houses. *Environment and Planning B: Planning and Design* 14: 323 – 350.
- Foley, James D., Andries van Dam, Steven K. Feiner, und John F. Hughes, 1996: *Computer Graphics: Principles and Practice in C*. Addison-Wesley Professional, 2. Aufl.
- Frahm, Jan-Michael, Pierre Fite-Georgel, David Gallup, Tim Johnson, Rahul Raguram, Changchang Wu, Yi-Hung Jen, Enrique Dunn, Brian Clipp, Svetlana Lazebnik, und Marc Pollefeys, 2010: Building Rome on a Cloudless Day. In: *Kostas Daniilidis, Petros Maragos, und Nikos Paragios (Hg.), Computer Vision – ECCV 2010*, Bd. 6314 von *Lecture Notes in Computer Science*. Springer Berlin / Heidelberg, S. 368 – 381.
- Frings, Marcus, 2002: The Golden Section in Architectural Theory. *Nexus Network Journal* 4: 9 – 32.
- Fu, King Sun, 1982: *Syntactic Pattern Recognition and Application*. Prentice-Hall.
- Furukawa, Yasutaka, Brian Curless, Steven M. Seitz, und Richard Szeliski, 2010: Towards Internet-scale multi-view stereo. In: *Proceedings of 23th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, June 13-18, 2010, San Francisco, California, USA. S. 1434 – 1441.
- Geman, S., und M. Johnson, 2002: Probabilistic grammars and their applications. *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences* 2002: 12075 – 12082.
- Goessele, Michael, Noah Snavely, Brian Curless, Hugues Hoppe, und Steven M. Seitz, 2007: Multi-View Stereo for Community Photo Collections. In: *Proceedings of ICCV*, Rio de Janeiro, Brasil.

- Gröger, Gerhard, und Lutz Plümer, 2005:* How to get 3-D for the price of 2-D-Topology and Consistency of 3-D Urban GIS. *Geoinformatica* 9: 139 – 158.
- Gröger, Gerhard, und Lutz Plümer, 2010:* Derivation of 3D Indoor Models by Grammars for Route Planning. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation* 2010: 191 – 206.
- Gröger, Gerhard, Thomas H. Kolbe, Angela Czerwinski, und Claus Nagel (Hg.), 2008:* OpenGIS City Geography Markup Language (CityGML). Open Geospatial Consortium.
- Gütting, Ralf Hartmut, und Martin Erwig, 1999:* Übersetzerbau. Springer.
- Haala, Norbert, und Martin Kada, 2010:* An update on automatic 3D building reconstruction. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 65: 570 – 580.
- Hargittai, István, und Magdolna Hargittai, 1994:* Symmetry: a unifying concept. Shelter Publications, Inc.
- Hartley, Richard, und Andrew Zisserman, 2006:* Multiple View Geometry in computer vision. Cambridge University Press.
- Herman, Martin, und Takeo Kanade, 1986:* Incremental reconstruction of 3D scenes from multiple, complex images. *Artificial Intelligence* 30: 289 – 341.
- Herzog, Thomas, Roland Krippner, und Werner Lang, 2004:* Fassaden Atlas. Birkhäuser Verlag.
- Hunter, Graham, 2009:* Mobile Mapping - The StreetMapper Approach. In: *Dieter Fritsch (Hg.), Proceedings of 52nd Photogrammetric Week, Stuttgart, Germany.*
- International Organization for Standardization, 1977:* Building construction - Stairs - vocabulary - Part I, ISO 3880/I-1977.
- International Organization for Standardization, 2004:* ISO/IEC 14772-2 - The Virtual Reality Modeling Language (VRML).
- International Organization for Standardization, 2009:* ISO/IEC 19776-1.2:2009 - Extensible 3D (X3D) encodings.
- Kelly, George, und Hugh McCabe, 2007:* Citygen: An Interactive System for Procedural City Generation. In: *Proceedings of 5th annual international conference in computer game design and technology, 14th-15th November 2007, Liverpool, UK.*
- Klein, Rolf, 2005:* Algorithmische Geometrie. Addison-Wesley, 2. Aufl.
- Knaak, Ulrich, Tillmann Klein, Marcel Bilow, und Thomas Auer, 2010:* Fassaden - Prinzipien der Konstruktion. Bikerhäuser Verlag.
- Knight, Terry W., 1999:* Shape grammars: six types. *Environment and Planning B: Planning and Design* 26: 15 – 31.

- Knuth, Donald E.*, 1968: Semantics of context-free languages. *Theory of Computing Systems* 2: 127 – 145.
- Knuth, Donald E.*, 1990: The genesis of attribute grammars. In: *Proceedings of the international conference on Attribute grammars and their applications*. S. 1 – 12.
- Koch, Karl-Rudolf*, 2004: *Parameterschätzung und Hypothesentests*. Dümmler, Bonn, 4. Aufl.
- Kolbe, T.H.*, 2000: Identifikation und Rekonstruktion von Gebäuden in Luftbildern mittels unscharfer Constraints. Dissertation, Hochschule Vechta.
- Koning, H.*, und *J Eizenberg*, 1981: The language of the prairie: Frank Lloyd Wright's prairie houses. *Environment and Planning B: Planning and Design* 8: 295 – 323.
- Korč, F.*, und *D. Schneider*, 2007: *Annotation Tool*. Techn. Ber. TR-IGG-P-2007-01.
- Krishnamurti, R.*, und *C. F. Earl*, 1992: Shape recognition in three dimensions. *Environment and Planning B: Planning and Design* 19: 585 – 603.
- Krückhans, Martin*, 2008: 3D Gebäudemodelle auf der Basis formaler Grammatiken am Beispiel der Bonner Südstadt. Diplomarbeit, Universität Bonn.
- Krückhans, Martin*, und *Jörg Schmittwilken*, 2009: Synthetische Verfeinerung von 3D-Stadtmodellen. In: *Proceedings of DGPF-Jahrestagung*. Jena 2009.
- Kumar, S.*, und *M. Hebert*, 2003: Discriminative Random Fields: A Discriminative Framework for Contextual Interaction in Classification. In: *Proceedings of International Conference on Computer Vision*. S. 1150 – 1157.
- Kutterer, Hansjörg*, 2010: *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*, Kap. 9: Mobile Mapping. CRC Press, S. 293 – 311.
- Larive, Mathieu*, und *Veronique Gaildrat*, 2006: Wall grammar for building generation. In: *GRAPHITE '06: Proceedings of the 4th international conference on Computer graphics and interactive techniques in Australasia and Southeast Asia*. ACM, S. 429 – 437.
- Lindenmayer, Aristid*, 1968: Mathematical models for cellular interaction in development: Parts I and II. *Journal of Theoretical Biology* 18: 280 – 315.
- Loch-Dehbi, Sandra*, und *Lutz Plümer*, 2011: Automatic Reasoning for Geometric Constraints in 3D City Models with Uncertain Observations. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 66: 177–187.
- Luo, Chao*, und *Gunho Sohn*, 2010: A knowledge based hierarchical classification tree for 3d facade modeling using terrestrial laser scanning data. In: *Proceedings of the 2010 Canadian Geomatics Conference and Symposium of Commission I, ISPRS*, June 15-18, 2010, Calgary, Canada, Bd. 38 von *IAPRS*. S. 195 – 200.
- Mäntylä, Martti*, 1988: *An Introduction to Solid Modeling*. Principles of Computer Science. Computer Science Press, Maryland, U.S.A.

- Marvie, Jean-Eudes, Julien Perret, und Kadi Bouatouch*, 2005: The FL-system: a functional L-system for procedural geometric modeling. *The Visual Computer* 21: 329 – 339.
- MathWorks*, 2010: Matlab. Webseite. URL <http://www.mathworks.de>. Zuletzt besucht: 30.11.2010.
- McGlone, Chris* (Hg.), 2004: Manual of Photogrammetry. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), Bethesda, USA, 5. Aufl.
- Meagher, Donald*, 1982: Geometric modeling using octree encoding. *Computer Graphics and Image Processing* 19: 129 – 147.
- Michael, Steven*, 2008: kdtree. Webseite. URL <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/7030-kd-tree-nearest-neighbor-and-range-search>.
- Mielke, Friedrich*, 1993: Handbuch der Treppenkunde. Verlag Th. Schäfer, Hannover.
- Mitchell, Tom M.*, 1997: Machine Learning. McGraw-Hill.
- Müller, Pascal, Peter Wonka, Simon Haegler, Andreas Ulmer, und Luc Van Gool*, 2006: Procedural Modeling of Buildings. *ACM Transactions on Graphics* 25: 614 – 623.
- Müller, Pascal, Gang Zeng, Peter Wonka, und Luc Van Gool*, 2007: Image-based procedural modeling of facades. *ACM Transactions on Graphics* 26: 85.
- Musialski, Przemyslaw, Meinrad Recheis, Stefan Maierhofer, Peter Wonka, und Werner Purgathofer*, 2010: Tiling of Ortho-Rectified Façade Images. In: Proceedings of 26th Spring Conference on Computer Graphics (SCCG 2010).
- Neubauer, W., M. Doneus, Studnicka N., und Riegel J.*, 2005: Combined high resolution laser scanning ad photogrammetrical documentation of the pyramids at Giza. In: Proceedings of the XXth International Symposium CIPA, Torino, 2005, Bd. 36 von *IAPRS*. S. 470 – 475.
- Neufert, Peter, Cornelius Neufert, Ludwig Neff, und Corinna Franken*, 2002: Bauentwurfslern. vieweg, 37. Aufl.
- Nevill-Manning, Craig G., und Ian H. Witten*, 1997: Identifying Hierarchical Structure in Sequences: A linear-time algorithm. *Journal of Artificial Intelligence Research* 7: 67 – 82.
- Nilsson, Nils J.*, 1980: Artificial Intelligence. Symbolic Computation. Springer-Verlag.
- Object Management Group*, 2006: Object Constraint Language (OCL) 2.0.
- Object Management Group*, 2007: Unified Modeling Language (UML) 2.1.1.
- Oracle*, 2011: Java. Webseite. URL <http://www.java.com>. Zuletzt besucht: 30.7.2011.
- Parish, Yoav I. H., und Pascal Müller*, 2001: Procedural Modeling of Cities. In: *Eugene Fiume* (Hg.), Proceedings of ACM SIGGRAPH 2001. New York, NY, USA: ACM Press, S. 301 – 308.

- Pauly, M., N. J. Mitra, J. Wallner, H. Pottmann, und L. Guibas*, 2008: Discovering Structural Regularity in 3D Geometry. *ACM Transactions on Graphics* 27: 1 – 11.
- Pech, Anton, und Andreas Kolbitsch*, 2005: Baukonstruktion Band 10 - Treppen/Stiegen. Springer-Verlag Wien.
- Pelleg, Dan, und Andrew W. Moore*, 2000: X-means: Extending K-means with Efficient Estimation of the Number of Clusters. In: *Proceedings of the Seventeenth International Conference on Machine Learning, ICML '00*. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., S. 727 – 734.
- Pictometry International Corp.*, 2010: Pictometry Oblique Imagery. Webseite. URL <http://www.pictometry.com>. Zuletzt besucht: 28.10.2011.
- Plümer, Lutz, Jörg Schmittwilken, Dirk Dörschlag, und Martin Krückhans*, 2009: Grammatikbasierte Fassadenrekonstruktion. In: *Geoinformation und Landmanagement DVW e.V.-Gesellschaft für Geodäsie* (Hg.), Beiträge zum 91. DVW-Seminar Terrestrisches Laserscanning (TLS 2009), 19. - 20.11. 2009, Fulda, Bd. 60 von *Schriftenreihe des DVW*. Wißner, S. 93 – 112.
- Portele, Clemens* (Hg.), 2007: OpenGIS Geography Markup Language (GML) Encoding Standard. Open Geospatial Consortium.
- Procedural Inc.*, 2010: Procedural. Webseite. URL <http://www.procedural.com>. Zuletzt besucht: 19.7.2010.
- Prokop, A., und H. Panholzer*, 2009: Assessing the capability of terrestrial laser scanning for monitoring slow moving landslides. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9: 1921 – 1928.
- Prusinkiewicz, Przemyslaw, und Aristid Lindenmayer*, 1991: The algorithmic beauty of plants. New York, NY, USA: Springer-Verlag New York, Inc.
- Pu, Shi, und George Vosselman*, 2006: Automatic extraction of building features from terrestrial laserscanning. In: *H.-G. Maas und D. Schneider* (Hg.), *Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology'*, 25-27 September 2006, Dresden, Germany, Bd. 36 von *IAPRS*.
- Pu, Shi, und George Vosselman*, 2007: Extracting Windows from Terrestrial Laser Scanning. In: *P. Rönholm, H. Hyyppä, und J. Hyyppä* (Hg.), *Proceedings of the ISPRS Workshop 'Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007'*, Bd. 36 von *IAPRS*. S. 320 – 325.
- Pu, Shi, und George Vosselman*, 2009: Knowledge based reconstruction of building models from terrestrial laser scanning data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64: 575 – 584.
- Pugliese, M., und J. Cagan*, 2002: Capturing a Rebel: Modeling the Harley-Davidson Brand through a Motorcycle Shape Grammar. *Research in Engineering Design* 13: 139 – 156.

- Rabbani, Tahir*, 2006: Automatic reconstruction of industrial installations using point clouds and images. Dissertation, TU Delft.
- Reyer, Eckhard and Willems, Wolfgang*, 1997: Lehrbuch der Hochbaukonstruktionen, Kap. 7: Außenwände. Teubner, Stuttgart, S. 285 – 404.
- Reznik, Sergiy*, und *Helmut Mayer*, 2008: Implicit Shape Models, Self-Diagnosis, and Model Selection for 3D Facade Interpretation. Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation 2008: 187 – 196.
- Ripperda, Nora*, 2008: Grammar Based Facade Reconstruction using RjMCMC. Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation 2008: 83 – 92.
- Ripperda, Nora*, 2009: Rekonstruktion von Fassadenstrukturen mittels formaler Grammatiken und Reversible Jump Markov Chain Monte Carlo Sampling. Dissertation, Universität Hannover.
- Ripperda, Nora*, und *Claus Brenner*, 2009: Application of a Formal Grammar to Facade Reconstruction in Semiautomatic and Automatic Environments. In: Proceedings of 12th AGILE Conference on GIScience.
- Rodehorst, Volker*, und *Olaf Hellwich*, 2006: Genetic Algorithm SAMPLE Consensus (GASAC) - A Parallel Strategy for Robust Parameter Estimation. In: CVPRW '06: Proceedings of the 2006 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, S. 103.
- Rusinkiewicz, Szymon*, und *Marc Levoy*, 2001: Efficient Variants of the ICP Algorithm. In: Proceedings of International conference on 3-D digital imaging and modeling.
- Russel, Stuard*, und *Peter Norvig*, 2003: Artificial Intelligence - A Modern Approach. Pearson Education.
- Rutzinger, M., A. K. Pratihast, S. Oude Elberink*, und *George Vosselman*, 2010: Detection and Modelling of 3D Trees from Mobile Laser Scanning Data. In: Proceedings of ISPRS Commission V Symposium "Close Range Image Measurement Techniques", Newcastle upon Tyne, UK, Bd. 38 von *IAPRS*. S. 520 – 525.
- Schmittwilken, Jörg*, und *Lutz Plümer*, 2009: Model Selection for Composite Objects with Attribute Grammars. In: Proceedings of 12th AGILE Conference on GIScience, June 2009, Hannover, Germany.
- Schmittwilken, Jörg*, und *Lutz Plümer*, 2010: Model-based reconstruction and classification of facade parts in 3D point clouds. In: Proceedings of PCV 2010 - ISPRS Technical Commission III Symposium on Photogrammetric Computer Vision and Image Analysis, 1-3 September 2010, Paris, France, Bd. 38 von *IAPRS*.
- Schmittwilken, Jörg, Jens Saatkamp, Wolfgang Förstner, Thomas H. Kolbe*, und *Lutz Plümer*, 2007: A Semantic Model of Stairs in Building Collars. Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation 2007: 415 – 427.

- Schmittwilken, Jörg, Dirk Dörschlag, und Lutz Plümer, 2009a:* Attribute grammar for 3D city models. In: *A. Krek, M. Rumor, S. Zlatanova, und E. M. Fendel* (Hg.), Proceedings of the Urban and Regional Data Management Society Symposium 2009, Ljubljana, Slovenia, 24-26 June 2009. UDMS, CRC Press, S. 49 – 58.
- Schmittwilken, Jörg, Michael Ying Yang, Wolfgang Förstner, und Lutz Plümer, 2009b:* Integration of conditional random fields and attribute grammars for range data interpretation of man-made objects. *Annals of GIS* 15: 117 – 126.
- Schnabel, Ruwen, Raoul Wessel, Roland Wahl, und Reinhard Klein, 2008:* Shape Recognition in 3D Point-Clouds. In: *V. Skala* (Hg.), Proceedings of the 16-th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision'2008. UNION Agency-Science Press.
- Schönfeld, Robby, 2008:* Alters- und Geschlechterdifferenzen in der Raumkognition - auch eine Frage der Lösungsstrategien. Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Marburg.
- Sithole, G., und G. Vosselman, 2004:* Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 59: 202 – 224.
- Staat, Christiane, und Jörg Schmittwilken, 2010:* MeasureFacade - An interactive MATLAB application for image and point cloud measurements. Techn. Ber., Professur für Geoinformation, Institut für Geodäsie und Geoinformation, Bonn University.
- Steinhage, Volker, 1999:* Zur automatischen Gebäuderekonstruktion aus Luftbildern. Habilitation.
- Stichlig, Udo, 2011:* Verbreitung und Bedarf von 3D-Geoinformation. persönliche Kommunikation mit dem Präsidenten des Deutschen Dachverbands für Geoinformation.
- Stiny, G., und J. Gips, 1972:* Shape Grammars and the Generative Specification of Painting and Sculpture. In: *C. V. Freiman und John E Griffith* (Hg.), Proceedings of IFIP Congress 71, Volume 2 - Applications, Ljubljana, Yugoslavia, August 23-28, 1971. S. 1460 – 1465.
- Stiny, G, und W J Mitchell, 1978:* The Palladian grammar. *Environment and Planning B: Planning and Design* 5: 5 – 18.
- Stiny, George, 1982:* Spatial relations and grammars. *Environment and Planning B: Planning and Design* 9: 113 – 114.
- Sullivan, Louis, 1896:* The tall office building artistically considered. *Lippincott's Magazine* 57: 403 – 409.
- Teboul, O., L. Simon, P. Koutsourakis, und N. Paragios, 2010:* Segmentation of building facades using procedural shape priors. In: Proceedings of 23th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 13-18, 2010, San Francisco, California, USA. S. 3105 – 3112.

- Torr, Philip H. S., und Andrew Zisserman*, 2000: MLESAC: a new robust estimator with application to estimating image geometry. *Computer Vision and Image Understanding* 78: 138 – 156.
- Toshev, Alexander, Philippos Mordohai, und Ben Taskar*, 2010: Detecting and Parsing Architecture at City Scale from Range Data. In: *Proceedings of 23th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, June 13-18, 2010, San Francisco, California, USA.
- Trescak, T., I. Rodriguez, und M. Esteva*, 2009: General Shape Grammar Interpreter for Intelligent Designs Generations. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualization*, 2009. CGIV '09. S. 235 – 240.
- Tyleček, Radim, und Radim Šára*, 2011: A Weak Structure Model for Regular Pattern Recognition Applied to Facade Images. In: *Ron Kimmel, Reinhard Klette, und Akihiro Sugimoto* (Hg.), *Computer Vision – ACCV 2010*, Bd. 6492 von *Lecture Notes in Computer Science*. Springer Berlin / Heidelberg, S. 450 – 463.
- Ueda, Kazunori*, 1986: Guarded Horn Clauses. Dissertation, University of Tokyo.
- Vanegas, C., D. Aliaga, und B. Benes*, 2010: Building Reconstruction using Manhattan-World Grammars. In: *Proceedings of 23th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, June 13-18, 2010, San Francisco, California, USA.
- Vosselman, George*, 1999: Building Reconstruction using Planar Faces in Very High Density Height Data. In: *Proceedings of IAPRS WG III/ 2 & 3 Workshop "Automatic Objects from Digital Imagery"*, 8-10 September 1999, Munich, Germany, Bd. 32 von *IAPRS*. S. 87 – 92.
- Wahl, Roland, Michael Guthe, und Reinhard Klein*, 2005: Identifying Planes in Point-Clouds for Efficient Hybrid Rendering. In: *The 13th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*.
- Wand, M. P., und M. C. Jones*, 1994: Kernel Smoothing. Chapman & Hal.
- Wang, Hanzi, und David Suter*, 2004: Robust adaptive-scale parametric model estimation for computer vision. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 26: 1459 – 1474.
- Weidner, Uwe, und W. Förstner*, 1995: Towards automatic building extraction from high-resolution digital elevation models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 50: 38 – 49.
- Wenzel, S., M. Drauschke, und W. Förstner*, 2008: Detection of repeated structures in facade images. *Pattern Recognition and Image Analysis* 18: 406 – 411.
- Williams, Kim*, 1999: Symmetry in Architecture. *Visual Mathematics* 1.
- Wonka, Peter, Michael Wimmer, François Sillion, und William Ribarsky*, 2003: Instant Architecture. *ACM Transactions on Graphics* 22: 669 – 677.

Xiao, Jianxiong, Tian Fang, Ping Tan, Peng Zhao, Eyal Ofek, und Long Quan, 2008: Image-based facade modeling. *ACM Transactions on Graphics* 27: 161:1 – 161:10.

Yastikli, Nanci, 2007: Documentation of cultural heritage using digital photogrammetry and laserscanning. *Journal of Cultural Heritage* 8: 423 – 427.

Zhu, Song-Chun, und David Mumford, 2006: A Stochastic Grammar of Images. *Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision* 2: 259 – 362.

Index

- Ableitungsbaum, 23
- Alphabet, 22
- Arbeitshypothese, 4
- Attribut, 26
 - ererbtes, 26
 - synthetisiertes, 26
- Attributgrammatik, 26
- Auftritt, 49

- B-Rep, 15
- Beam Search, 96
- Bedingung, 84
- Boundary Representation, 15
- Bounding Box, 62
- Brüstung, 48

- Chomsky-Hierarchie, 23
- Constraint, 84
- Constructive Solid Geometry, 15
- CSG, 15

- db-scan, 19
- Dichte
 - empirische, 13
 - Wahrscheinlichkeits-, 13

- Erker, 47

- Fassade, 47
 - grammatik, 26, 87
- Fenster, 48
 - bank, 48
 - spalte, 53
 - zeile, 54
 - Treppenhaus-, 54
- Fitness, 61
- Formparameter, 89

- gain ratio, 75
- Gebäude, 45
- Gebäudemodell
 - synthetische, 32
- Geometriemodell, 50
- Grammatik, 22
 - attributierte, 26, 83
 - beliebig, 23
 - CGA shape, 33
 - Fassaden-, 26
 - formale, 83
 - Gebäude-, 32–37
 - geometrische, 29–37, 87–93
 - kontextfrei, 23, 24
 - kontextsensitiv, 23
 - L-System, 31
 - probabilistisch, 24
 - regulär, 23
 - Set-, 33
 - Shape-, 29
 - Split-, 33
 - Treppe-, 22
- Guard, 85, 99, 100

- Häufigkeitsverteilung, 51
- Harmonie, 44
- Hauptfassade, 47
- Hauptkomponentenanalyse, 19
- Hough Transformation, 19

- inductive bias, 19
- Interpretation, 18

- k-means, 19
- Kerndichteschätzer, 14, 52
- Klassifikation, 18
- Klassifikationsverfahren

- überwachte, 18
- unüberwachte, 18
- Klassifizierung, *siehe* Klassifikation
- L-System, 31
- Lageparameter, 89
- Laibung, 48
- LIDAR, 16
- Maximum Likelihood Schätzung, 52
- Merkmal, 73
 - raum, 17
 - vektor, 17
- Minimum Bounding Rectangle, 98
- MLESAC, 21
- Modell
 - Parameter, 51
 - geometrisches, 15, 50
 - probabilistisches, 13
 - semantisches, 44
- MOSAP, 59
- Mustererkennung, 17
- Nichtterminalsymbol, 97, 98
- Orthogonalität, 44
- Parallelität, 44
- Parser
 - parse3d, 95
- PCA, 19
- Podest, 49
- Prädiktion, 59, 61, 76
 - güte, 61, 68
- Prädiktionsgüte, 76
- Principle Component Analysis, 19
- Produktionsregel, 97
 - Selektion, 99
- Proportion, 43
- Random Sample Consensus, 20
- RANSAC, 20
- Regel
 - Produktions-, 21, 97
 - semantische, 26, 84
- Registrierung, 17
- Rekonstruktion, 18, 59
- Sampling
 - Form, 66, 72
 - formbasiert, 61
 - Lage, 64, 71
 - lagebasiert, 61
 - modellbasiert, 60
 - Stochastic Universal -, 61
- Schrittmaßregel, 50
- Semantik, 44
- Shape-Grammatik, 29
- Spiegelsymmetrie, 44
- Sprache, 22
- Steigung, 49
- Stochastic Universal Sampling, 61
- Strukturlinien, 56
- Stufe, 49
- Sturz, 48
- SUS, 61
- Symbol
 - Nichtterminal-, 21, 97
 - Start-, 21
 - Terminal-, 21
- Symmetrie, 43
 - Spiegel-, 44
 - Translations-, 44
- Teilfassade, 47
- Tesselation, 50
- Translationssymmetrie, 44
- Treppe, 49
 - grammatik, 22
 - lauf, 49
- Treppenlauf, 49
- Unifikation, 86
- Vorsprung, 47
- Vorwissen, 51, 64, 71, 91
 - Formparameter, 66, 72
 - Lageparameter, 64, 71
- VRML, 15, 138
- Wahrscheinlichkeit, 13, 61, 97
 - dichte, 13, 52

Wand, 45
x-means, 19
X3D, 15, 138
XGep, 92, 137
XML, 137
XSLT, 137