

Fachbereich 6 Mathematik/Informatik

Masterarbeit

**Graphenbasierte Erkennung und  
topologische Darstellung von Dachformen  
in Punktwolken zur automatischen  
Rekonstruktion von 3D-Stadtmodellen**

Bastian Albers\*

Osnabrück, 20. März 2014

Erstprüfer: M.Sc. Andreas Wichmann  
Zweitprüfer: Juniorprof. Dr.-Ing. Martin Kada

Institut für Geoinformatik  
und Fernerkundung  
Universität Osnabrück



\*Matrikelnummer: 937059

# Zusammenfassung

Ein 3D-Stadtmodell repräsentiert digitale urbane Objekte einer Stadt, zum Beispiel Gebäude und Straßen, und wird für eine Vielzahl von Anwendungen in der Praxis eingesetzt. Traditionelle Methoden zur Erstellung von 3D-Stadtmodellen basieren oft auf manueller Digitalisierung einzelner Punkte. Dieser immense Arbeitsaufwand kann durch automatisierte Prozesse stark vereinfacht und beschleunigt werden.

In den letzten zwei Dekaden hat eine verbesserte Genauigkeit und Qualität der Laserscanningtechnik zum gesteigerten Interesse der Forschung in diesem Gebiet beigetragen. Diese Arbeit untersucht daher das Potenzial der graphenbasierten Erkennung und topologischen Darstellung von Dachformen in Punktwolken zur automatischen Rekonstruktion von 3D-Stadtmodellen.

Der vielversprechende Ansatz der graphenbasierten Gebäude-Rekonstruktion modelliert aus segmentierten Dachflächen einen topologischen Graphen. Über einen Teilgraph-Matching-Algorithmus werden zuvor definierte Zielgraphen aus einer Bibliothek in den topologischen Dachgraphen detektiert und dementsprechend klassifiziert.

Untersucht werden vor allem der Einfluss von Segmentierung, Schnittkantenberechnung und -typisierung auf die Erstellung der topologischen Graphen und das spätere Matching. Die automatisierte Berechnung bestimmter Qualitätsmerkmale zur Beurteilung dieser Ergebnisse vereinfacht dabei den Vergleich unterschiedlicher Parameter und den definierten Regelsätzen. Zur einfacheren Interpretierbarkeit der Ergebnisse wird zusätzlich ein Prototyp zur Visualisierung der Graphen und 3D-Punktwolken vorgestellt.

Die Ergebnisse des Teilgraph-Matching zeigen für größere Dachflächen und einfache Dachtopologien gute Klassifizierungen. Durch Über- und Untersegmentierung der lückenhaften Laserdaten werden kleinere Dachsegmente häufig fehlinterpretiert und resultieren daher in einer verfälschten Dachtopologie. Das Teilgraph-Matching mit einer zuvor definierten Bibliothek für Zielgraphen ist daher nicht immer erfolgreich. Probleme und Lösungsansätze werden im Verlauf der Arbeit vorgestellt.

# Abstract

A 3D-City-Model represents digital urban objects of a city, for example buildings and streets, and is being used in practice for a variety of applications. Traditional methods for generating 3D-City-Models are often based on manually digitizing single points. This huge workload can be drastically reduced and advanced by automatic processes.

The last two decades showed an enhanced accuracy and quality of laser scanning technology and increased interest of researchers in this field. Therefore this thesis examines the potential of graph based detection and topological representation of roof shapes in point clouds for an automatic reconstruction of 3D-City-Models.

The promising approach of graph based building reconstruction models a topological graph from segmented roof surfaces. A subgraph matching detects and classifies predefined target graphs from a library in topological roof models.

The influence of segmentation, computing and labeling intersections on generating topological graphs and the following subgraph matching is of primary interest. Automatic evaluation of specific quality characteristics for the assessment of these results simplifies the comparison of different parameters and the defined set of rules. For a better interpretation of results a prototype for visualizing graphs and 3D point clouds is introduced.

The results of subgraph matching show a good classification for big roof surfaces and simple roof topologies. Over- and undersegmentation is still a problem and is often influenced by gaps and incomplete laser scanning data. Smaller roof segments are often falsely interpreted and eventuate in a distorted roof topology. Therefore subgraph matching with a predefined target graph library is not always successful. Problems and approaches to solve these are presented in this thesis.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>ii</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>iii</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation und Zielsetzung . . . . .	2
1.2 Aufbau dieser Arbeit . . . . .	3
<b>2 Stand der Forschung</b>	<b>5</b>
2.1 3D-Gebäuderekonstruktion . . . . .	5
2.1.1 Modellgestützte Ansätze . . . . .	6
2.1.2 Datengestützte Ansätze . . . . .	10
2.1.3 Hybride Ansätze . . . . .	14
2.2 Graphenbasierte Gebäuderekonstruktion . . . . .	15
<b>3 Graphenbasierte Erkennung von Dachformen</b>	<b>20</b>
3.1 Segmentierung . . . . .	20
3.2 Schnittkantenberechnung . . . . .	21
3.3 Erstellung von topologischen Graphen . . . . .	23
3.4 Bibliothek für Zielgraphen . . . . .	24
3.5 Teilgraph-Matching . . . . .	27
<b>4 3D-Visualisierung von topologischen Graphen</b>	<b>31</b>
4.1 Algorithmen zum Zeichnen von Graphen . . . . .	31
4.2 Graphzeichnen mit geographischen Beschränkungen . . . . .	32
4.3 Anforderungskatalog für eine Visualisierungsumgebung . . . . .	35
4.4 Vergleich von Programmbibliotheken . . . . .	36
4.5 Umsetzung und Ausblick . . . . .	37
<b>5 Ergebnisse und Diskussion</b>	<b>41</b>
5.1 Untersuchungsgebiet und Datengrundlage . . . . .	41
5.2 Evaluation der Schnittkantenberechnung . . . . .	42
5.3 Evaluation des Teilgraph-Matching . . . . .	50
5.4 Vergleich von unterschiedlichen Regelsätzen . . . . .	54
5.5 Ergebnisdiskussion . . . . .	56
<b>6 Fazit und Ausblick</b>	<b>59</b>
<b>Literatur</b>	<b>I</b>
<b>Anhang</b>	<b>VII</b>

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Ablauf der 3D-Gebäuderekonstruktion . . . . .	7
2.2	Beispiel einer RJMCMC-Rekonstruktion . . . . .	9
2.3	Formregulierung einer BSP-basierten Rekonstruktion . . . . .	13
2.4	Ergebnisse einer hybriden Rekonstruktion . . . . .	15
2.5	Teilgraph-Matching-Algorithmus . . . . .	16
2.6	Bearbeitungsverzeichnis für Dachtopologiegraphen . . . . .	18
3.1	Ablaufdiagramm des Teilgraph-Matching-Algorithmus . . . . .	21
3.2	Auswirkungen verschiedener Schnittkantenberechnungsoperationen . . . . .	22
3.3	Berechnung der Schnittkantenlänge bei verschiedenen Operationen . . . . .	22
3.4	Entwicklung eines topologischen Graphen . . . . .	25
3.5	Aufteilung einer komplexeren Dachtopologie . . . . .	25
3.6	Mögliche Fehlklassifikation bei einem Walmdach . . . . .	28
4.1	Graphzeichnen mit geographischen Beschränkungen . . . . .	33
4.2	3D-Graphzeichnen und Kantenbündelung . . . . .	35
4.3	Prototyp des 3D-Web-Viewers . . . . .	39
4.4	Problematische Knotenvisualisierung . . . . .	39
5.1	Untersuchungsgebiet Vaihingen . . . . .	42
5.2	Datensatz der Vaihingen Punktwolke . . . . .	43
5.3	Erstellte Referenzkanten mit Kantentyp und Vorkommen . . . . .	44
5.4	Schnittkantenbestimmung mit maximaler Ausdehnung . . . . .	45
5.5	Schnittkantenbestimmung mit boolescher Vereinigung . . . . .	46
5.6	Schnittkantenbestimmung mit boolescher Schnittmenge (1 m Puffer) . . . . .	46
5.7	Schnittkantenbestimmung mit boolescher Schnittmenge (0,5 m Puffer) . . . . .	47
5.8	Optimierung des maximal fortlaufenden Punktabstands . . . . .	50
5.9	Ergebnis des Teilgraph-Matchings in einer 3D-Visualisierung . . . . .	51
5.10	Ergebnis des Teilgraph-Matchings . . . . .	51
5.11	Fehlklassifikation eines komplexeren Gebäudes . . . . .	53
5.12	Fehlerquelle Vegetation . . . . .	53
5.13	Vergleich verschiedener Bibliotheken für Zielgraphen . . . . .	54

# Tabellenverzeichnis

3.1	Aufteilung der Schnittkantentypen . . . . .	23
3.2	Bibliothek für Zielgraphen . . . . .	26
4.1	Vergleich verschiedener Programmierbibliotheken . . . . .	38
5.1	Verteilung der Referenzkanten nach Typ . . . . .	43
5.2	Vergleich der Parameter für die Schnittkantenberechnung . . . . .	48
5.3	Vergleich der Parameteroptimierung für die boolesche Schnitt-Operation	49
5.4	Evaluation des Teilgraph-Matching . . . . .	52
5.5	Übersicht verschiedener Regelsätze für Zielgraph Bibliotheken . . . . .	55
5.6	Ergebnisse unterschiedlicher Zielgraph Bibliotheken . . . . .	56

# 1 Einleitung

Aktuelle Laserscanningtechnik liefert dichte und georeferenzierte Punkte, die für eine große Anzahl von Anwendungen eingesetzt werden. Die in den letzten Jahren stark verbesserte Auflösung und kommerzielle Verbreitung der Aufnahmesysteme fördert das gesteigerte Interesse der Wissenschaft. Besonders die automatisierte Extraktion und Rekonstruktion von urbanen Szenen aus dreidimensionalen Laserdaten nimmt hierbei ein grundlegendes Standbein der Forschung ein.

Ein 3D-Stadtmodell ist ein Modell von urbanen Objekten (z.B. Gebäude und Straßen), die eine digitale Repräsentation einer Stadt darstellen. Doch in welchen Bereichen werden 3D-Stadtmodelle und insbesondere die Gebäuderekonstruktion praktisch eingesetzt? Die Bandbreite reicht von der Telekommunikationsplanung für Standorte von Antennen bis zu Computerspielen. Wichtig sind auch Tourismus und Stadtmarketing, die sich vor allem für Augmented Reality und Location Based Services interessieren. Stadtplanung und Navigationssysteme setzen zunehmend auf dreidimensionale Ansichten der Gebäude und bieten so einen guten Überblick für den Anwender. Interessante Anwendungen finden sich auch in der Modellierung von Mikroklima und Lärmausbreitung in urbanen Regionen. Die Berechnung der Sonneneinstrahlung für ein Solardachkataster wird durch exakte 3D-Modelle von Dächern noch genauer. Lebenswichtigen Einsatz findet diese Technologie im Katastrophenmanagement, beispielsweise bei Überflutung und Evakuierung von gefährdeten Gebieten (vgl. Brenner, 2000; Brenner, 2010). Einen umfassenderen Überblick über die zugrunde liegende Technik von Laserscanning und weitere Anwendungsgebiete liefern Shan und Toth (2009) und Vosselman und Maas (2010).

Viele Methoden zur Rekonstruktion von 3D-Stadtmodellen aus Laserscanningdaten basieren nicht allein auf einem einzigen Datensatz, sondern kombinieren unterschiedliche Bildquellen (Luft- und Satellitenbildaufnahmen), Punktwolken aus variierenden Systemen (terrestrische und luftgestützte) und weiteren Geodaten (z.B. Grundrisspläne und Katasterdaten). Abhängig von diesen Daten ist zumeist auch der Detaillierungsgrad (engl. Levels of Detail, kurz LOD) der Gebäudemodelle und kann daher je nach Rekonstruktionsmethode stark variieren (vgl. Brenner, 2010, S. 187).

## 1.1 Motivation und Zielsetzung

Die Motivation dieser Arbeit ist es, Gebäudewissen in den Rekonstruktionsprozess zu integrieren und so, unabhängig von der Geometrie und Topologie, eine semantische Information der Objekte zu erhalten. Ein wichtiger Aspekt der 3D-Stadtmodelle ist demnach eine für den Menschen verständliche Kennzeichnung der Objekte als beispielsweise Dach, Fenster oder Schornstein (vgl. Lafarge u. a., 2010b).

Diese Arbeit basiert daher auf dem vielversprechenden Verfahren der graphenbasierten Erkennung der Dachtopologie. Nachbarschaftsbeziehungen werden aus einer segmentierten Punktwolke für jede identifizierte Dachfläche anhand ihrer Schnittkanten und räumlichen Lage bestimmt und als topologischer Graph modelliert. Über ein Teilgraph-Matching werden Dachtypen anhand von Zielgraphen erkannt und in Beziehung zu Gebäudemodellen gesetzt. Diese Zielgraphen sind topologische Repräsentationen von typischen Dächern und werden in einer Bibliothek vorgehalten. So wird die Erkenntnis gewonnen, was für eine Art von Dachform vorliegt und aus welchen Dachprimitiven diese besteht. Unabhängig von der Geometrie des Gebäudes und den Punktdaten kann demnach eine weiterführende flexiblere Rekonstruktion umgesetzt werden.

Als zu untersuchende Forschungsaspekte für diese Arbeit ergeben sich:

- Umsetzung eines Teilgraph-Matchings und somit die Zuweisung von semantischen Informationen zu Objekten in 3D-Gebäudemodellen

Untersucht werden die Vorteile gegenüber anderen Gebäuderekonstruktionsverfahren und wie gut sich das Teilgraph-Matching auf neue Datensätze anpassen beziehungsweise erweitern lässt.

- Untersuchen der Abhängigkeit des Verfahrens von der Bibliothek für Zielgraphen

Hierbei wird geprüft, wie stark das Verfahren von der zugrunde liegenden Bibliothek in Umfang und Art der Zielgraphen abhängig ist. Wie generalisiert dürfen die entsprechenden Graphen für Dachformen modelliert sein, um ausreichend Informationen für eine 3D-Rekonstruktion ableiten zu können?

- Qualitative Beurteilung des Teilgraph-Matchings und Evaluation der Ergebnisse der Zwischenschritte

Qualitätsevaluierungen beziehen sich zumeist nur auf die Ergebnisse der rekonstruierten 3D-Modelle (vgl. Rottensteiner u. a., 2012). Hochgenau erstellte Daten dienen hierzu als Referenz und über verschiedene Werte wird ein Qualitätsmerkmal berechnet. Jedoch lässt sich aus den Ergebnissen alleine nicht immer schließen, wo genau Fehlerquellen entstehen und wie diese behoben werden können. Daher soll bereits in den



Zwischenschritten (z.B. nach der Schnittkantenberechnung) eine möglichst automatisierte Evaluation durchgeführt werden. Eine frühzeitige Identifizierung von Problemen und Fehlern ist das Ziel dieser Bemühungen.

- Optimierung für die Berechnung der Schnittkantenparameter und Analyse der Abhängigkeit der Klassifizierung von Länge der Schnittkante

Da die topologischen Graphen auf den Schnittkanten und der Adjazenz der Dachflächen basieren, wird eine Optimierung der Berechnungsparameter untersucht und verglichen, wie stark die Typisierung einer Schnittkante von ihrer Länge abhängt.

- Identifizierung typischer Dachformen und Ableitung einer sinnvollen Klassifizierung von Schnittkantentypen

Es wird analysiert, inwieweit eine sinnvolle Modellierung der topologischen Graphen von den zugrunde liegenden Schnittkanten abhängt und welche Typen für häufig auftretende Dachformen benötigt werden. Zusätzlich wird geprüft, wie gut sich diese Schnittkantentypen global anwenden lassen.

- Automatisierung des Verfahrens prüfen und ermitteln, ob sich durch das Ableiten von Parametern aus den Daten Vorteile ergeben

Eine wichtige Frage für alle Ansätze ist, wie stark sich diese automatisieren lassen. Jeder Punkt wird bei manuellen Standardverfahren per Hand über Stereo Photogrammetrie digitalisiert. Dies bedeutet nicht nur einen immensen Arbeitsaufwand für den Zulieferer, sondern auch hohe Kosten für den Auftraggeber. Preise für eine Aktualisierung eines 3D-Stadtmodells werden bei bisherigen manuellen Verfahren auf bis zu 70 % der initialen Kosten geschätzt (vgl. Brenner, 2005).

- Verbesserte Interpretation von Laserdaten und topologischen Graphen durch 3D-Visualisierung und Fusion der eingesetzten Daten

Aktuelle Entwicklungen im Bereich der 3D-Visualisierung bieten viele Anknüpfungspunkte für ein besseres Verständnis der eingesetzten Datensätze. Es soll geprüft werden, inwieweit diese Vorzüge nutzbar gemacht werden können, um Laserscanningdaten und die zuvor genannten topologischen Graphen zu fusionieren und einen Mehrwert in der Visualisierung und Informationsgewinnung zu schaffen. Ein Vergleich unterschiedlicher Programmierbibliotheken soll Möglichkeiten und Grenzen für eine prototypische Entwicklung aufzeigen.

## 1.2 Aufbau dieser Arbeit

Diese Arbeit teilt sich insgesamt in sechs Kapitel auf. Zunächst wird in Kapitel 2 der aktuelle Forschungsstand der 3D-Gebäuderekonstruktion aufgezeigt. Neben allgemeinen Informationen werden ausgesuchte Studien vorgestellt. Abschnitt 2.2 widmet sich

dabei gezielt der graphenbasierten Rekonstruktion von 3D-Stadtmodellen. Kapitel 3 zeigt den Ablauf der graphenbasierten Erkennung von Dachformen und gibt im Detail Auskunft über Methodik und die verwendeten Regeln zur Detektion von Zielgraphen in topologischen Graphen. In Kapitel 4 wird das Thema Algorithmen zum Zeichnen von Graphen aufgegriffen und ein Anforderungskatalog für eine Visualisierungsumgebung definiert. Ergebnisse des Teilgraph-Matchings und der Schnittkantenberechnung werden in Kapitel 5 dargestellt. Kapitel 6 stellt den Abschluss dieser Arbeit dar und fasst kurz das erlangte Wissen zusammen und gibt einen Ausblick für zukünftige Weiterentwicklungen und mögliche Forschungsfelder.

## 2 Stand der Forschung

Die 3D-Gebäuderekonstruktion ist seit mehr als zwei Dekaden ein wichtiger Bestandteil photogrammetrischer Forschung (vgl. Haala und Kada, 2010). Aufgrund von immer besseren Aufnahmesystemen und dadurch höher angesetzten Modellanforderungen ist die Extraktion von urbanen Objekten auch heute noch ein aktives Untersuchungsfeld (vgl. Oude Elberink, 2010; Rottensteiner u. a., 2012). Es lässt sich feststellen, dass die Forschung sich weg von der einfachen Visualisierung, hin zu einer sehr detaillierten Repräsentation von Objekten entwickelt hat. Hierbei werden semantische Informationen und Topologie der einzelnen Gebäudeteile für weiterführende Analysen immer wichtiger (vgl. Brenner, 2010, S. 169 ff.).

Die folgenden Abschnitte liefern einen Überblick über den aktuellen Forschungsstand der 3D-Gebäuderekonstruktion. Hierbei wird zunächst allgemein auf Entwicklungen in diesem Gebiet eingegangen und erläutert, wie sich die einzelnen Verfahren grob einteilen lassen und welche Ansätze sie verfolgen. Der zweite Teil beschäftigt sich mit den in dieser Arbeit eingesetzten Verfahren und welche Vor- und Nachteile sie gegenüber den zuvor genannten Ansätzen bieten. Da sich diese Arbeit auch mit der Dachrekonstruktion auseinandersetzt, werden im Folgenden die wesentlichen Aspekte aus diesem Forschungsbereich vorgestellt.

### 2.1 3D-Gebäuderekonstruktion

Bisher werden grundsätzlich zwei Typen bei der Gebäuderekonstruktion unterschieden: modell- und datengestützte Verfahren (vgl. Tarsha-Kurdi u. a., 2007). Erstere Ansätze versuchen aus vorhandenen Daten entsprechende Modelle in einer zuvor definierten Bibliothek von Gebäudegrundformen zu extrahieren (vgl. Kap. 2.1.1). Datengestützte Ansätze modellieren Gebäude unabhängig ihrer Form und berechnen benötigte Parameter aus den Daten selber (vgl. Kap. 2.1.2). Da die Grenzen zwischen diesen Ansätzen nicht festgelegt sind und einige Verfahren sich beider Ansätze bedienen, existieren auch sogenannte hybride Verfahren (vgl. Brenner, 2010, S. 186), die an Beispielen in Kapitel 2.1.3 erläutert werden.

Bestehende Methoden lassen sich weiterhin in automatische und semi-automatische Verfahren einteilen. Ziel der Forschung ist die voll-automatische und autarke Rekonstruktion ohne manuelle Intervention. Da dies jedoch bei solch komplexen Systemen

wie urbanen Regionen selten möglich ist, werden Vor- oder Nachbearbeitungsschritte formuliert, die dabei helfen sollen, die Zuverlässigkeit der Ergebnisse zu erhöhen (vgl. Brenner, 2010, S. 187 ff.).

Ein natürliches und häufig auftretendes Produkt der Rekonstruktion ist die Generalisierung. Viele Verfahren versuchen neben einer möglichst detailreichen Nachbildung von Gebäuden diese zusätzlich in unterschiedlichen Generalisierungsstufen, auch Levels of Detail (kurz LOD) genannt, einzuteilen (vgl. SIG 3D - AG Qualität, 2013). Dies führt je nach Zoom-Stufe zu einer verbesserten Grafikperformanz und ermöglicht es dem Nutzer, je nach Anwendung, sich auf das Wesentliche der Informationen zu konzentrieren.

Probleme und Fragestellungen, die während der Gebäuderekonstruktion auftreten, sind unter anderem topologischen und regelbasierten Ursprungs (vgl. Brenner, 2010, S. 196 f.). Hierbei muss entweder die Entscheidung getroffen werden, ob die Topologie korrigiert oder die beste Anpassung gewählt werden soll. Eine Veränderung der Topologie führt jedoch zu einer verfälschten Datengrundlage und dadurch möglicherweise zu einer Interpretation der gemessenen Daten, die nicht der Realität entspricht. Da Gebäude keine natürlichen Phänomene sind, werden viele Annahmen über bestimmte Parameter getroffen. Rechte Winkel, Parallelität und identische Dachneigungen sind beispielsweise häufig auftretende Merkmale, die durch einfache Berechnungen überprüft werden. Laserdaten, vor allem mit geringer Punktdichte, sind in ihrer Abbildung der Realität eingeschränkt und nicht frei von Fehlern. Eine Abwägung von harten und weichen Beschränkungen (engl. hard and soft constraints) ist daher das Resultat vieler Methoden (vgl. Brenner, 2010).

Abbildung 2.1 zeigt einen generalisierten Ablauf einer Rekonstruktion. Für die Detektion von Gebäuden werden die Punkte einer Punktwolke (2.1(a)) häufig in unterschiedliche Klassen (z.B. Gebäude, Boden, Vegetation, etc.) eingeteilt. Definierte Algorithmen sorgen nun dafür, dass aus den als Gebäude klassifizierten Punktdaten (2.1(b)) dreidimensionale Objekte in bestimmten Detailstufen erzeugt werden (2.1(c)).

### 2.1.1 Modellgestützte Ansätze

Der erste Typ, in den grob die verschiedenen Rekonstruktionsansätze unterteilt werden, ist ein modellgetriebener (model-driven oder top-down) Ansatz. Über bestimmte Operationen werden Parameter berechnet, die dabei helfen sollen, aus einer großen Sammlung an zuvor definierten Gebäudemodellen die bestmögliche Übereinstimmung mit den Eingabepunkten zu finden.

So rekonstruieren Kada und McKinley (2009) LOD2 Gebäudemodelle mit Hilfe von LIDAR-Daten und Gebäudegrundflächen. Zunächst werden die Grundrisse in sich nicht überschneidende Zellen zerlegt, wobei die Generierung von viereckigen Flächen bevorzugt wird. Komplexere Gebäude werden so in simplere Grundformen aufgeteilt. Um

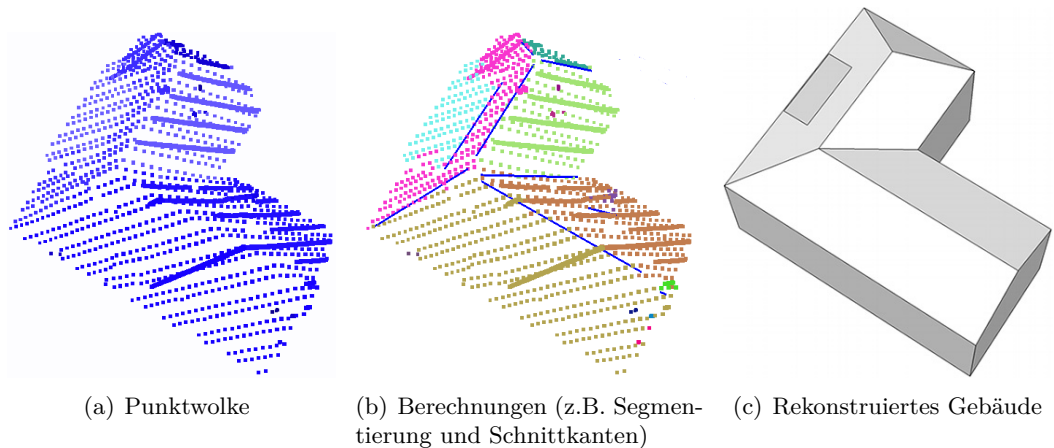


Abbildung 2.1: Ablauf der 3D-Gebäuderekonstruktion.

einheitliche Flächen zu erzeugen, findet eine Generalisierung der Grundrissfläche statt. Eine Segmentierung der LIDAR-Punkte wird über die Zuordnung dieser zu den zugrundeliegenden Zellen durchgeführt, eine weiterführende Segmentierung findet nicht statt.

Da dieser Ansatz modellgestützt ist, werden im folgenden Schritt Dachformen klassifiziert, wobei die drei Typen *basic*, *connecting* und *manual* zum Einsatz kommen. Die erste Klasse *basic* beschreibt Grundformen von Dächern wie beispielsweise Sattel-, Walm- oder Berliner-Dach. Die zweite Klasse *connecting* enthält Beispiele für verbindende Dachformen mit Gauben, Kehlen oder Graten. In die dritte Klasse *manual* werden Gebäude klassifiziert, die zu komplex für diesen Ansatz sind und daher von einem Anwender manuell bearbeitet werden müssen. Für die Bestimmung der Dachform einer Zelle werden die Normalenvektoren der Punkte, die auf Basis einer lokal geschätzten Ebene des Punktes selbst und seiner Nachbarpunkte bestimmt werden, mit den Dachflächen aller möglichen Grundformen verglichen. Jeder Grundform liegt ein bestimmter Regelsatz zu Grunde, wonach entschieden wird, ob die Zelle dieser Grundform zugeordnet wird.

Angewendet wurde diese 3D-Rekonstruktion auf größere Datensätze von Berlin und Köln. Ein Nachteil ist sicherlich die manuelle Nachbearbeitung, wobei der Anteil in dichteren Regionen zwischen 20–30 % und außerhalb zwischen 15–20 % liegt. Da die Zuordnung der LIDAR-Punkte nur anhand der zugrunde liegenden Zellen stattfindet, gehen bestimmte Details der Dachflächen verloren. Eine gesonderte Segmentierung der Punktdaten wird daher von den Autoren vorgeschlagen, um die Detailtiefe und Automatisierung zu verbessern.

Einen anderen Ansatz verfolgen Lafarge u. a. (2008) mit einer Methode basierend auf dem Reversible-Jump Markov Chain Monte Carlo (RJMCMC) Verfahren (vgl. Green, 1995) zur Extraktion von Gebäuden. Eingesetzt wird hierbei ein digitales Oberflächen

Modell (engl. digital surface model, kurz DSM), aus dem die Gebäudegrundrisse extrahiert werden. Der RJMCMC Sampler platziert dazu willkürlich ein Rechteck mit einer bestimmten Position, Breite, Tiefe und Orientierung auf dem DSM und berechnet anhand einer sogenannten Energie-Funktion, wie gut das vorgeschlagene Rechteck zu den entsprechenden Strukturen im DSM passt. Diese Methodik ist rechenintensiv, jedoch kann durch Vorwissen die Kernel-Funktion der Methode beeinflusst werden, wodurch in kürzerer Zeit bessere Samples ermöglicht werden (vgl. Brenner, 2010, S. 196).

Die eigentliche Gebäuderekonstruktion wird anhand der zuvor berechneten Grundrisse durchgeführt. Da das digitale Oberflächenmodell wenig Details über die Dachform vorhält, sind die Ergebnisse stark generalisiert und genügen nicht den Anforderungen für weiterführende Analyseziele. Lafarge u. a. (2010a) schlagen daher eine Erweiterung des bisherigen Ansatzes durch eine Bibliothek von 3D-Blöcken, ähnlich wie bei Kada und McKinley (2009), vor. Es werden neun Grundformen vorgeschlagen, die jeweils bestimmte Varianten zulassen. Jede dieser Formen besitzt mehrere Parameter, die durch einen Regelsatz beschrieben werden. Durch hochauflösende DSM (0,1 m) können auch kleinere Objekte, z.B. Gauben oder Schornsteine, rekonstruiert werden. Schwierigkeiten bestehen weiterhin bei sich ähnelnden Dachformen (ein Satteldach mit einer geringen Neigung wird beispielsweise oft als Schrägdach mit nur einer Dachfläche rekonstruiert) oder Dachformen, die nicht durch die Bibliothek abgedeckt sind.

Einen weiteren modellgestützten Ansatz stellen Henn u. a. (2013) vor. Neben einem Dachmodellkatalog mit zehn Grundformen werden hier zusätzlich stochastische Schätzmethoden und eine Methode für das überwachte maschinelle Lernen kombiniert. Anders als vorherige Ansätze, versucht dieser zusätzlich mit Punktwolken von sehr geringer Dichte (Beispiele mit 1,08 und 1,13 Punkte/m<sup>2</sup>) möglichst genaue Rekonstruktionen zu berechnen. Wie bei Tarsha-Kurdi u. a. (2008) wird ein angepasster Random Sample Consensus (RANSAC) Algorithmus für die Gebäuderekonstruktion eingesetzt, jedoch nicht für die Suche nach der besten Dach-Ebene in einer Punktwolke, sondern, wie in diesem Fall, um Kandidaten für verschiedene Modelle eines Gebäudes zu finden.

Da die Anzahl der Punkte, die ein Modell beschreiben, extrem gering sein kann (z.B. zwei Punkte für ein Giebeldach mit einem First in der Mitte), werden häufig mehrere Kandidaten für ein Gebäude gefunden. Um nun den möglichst besten Kandidaten herauszufiltern, wird eine überwachte Klassifizierung mittels Support Vector Machines (kurz SVM, vgl. Schölkopf und Smola, 2002) durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen vor allem für die Klassifikation gute Werte (bis zu 95 %, vgl. Henn u. a., 2013). Weniger genau ist die Klassifikation für Schrägdächer und häufig wird jede Dachfläche eines Giebeldachs als eigenständiges Dach betrachtet und daher falsch ausgewertet. Aufwendig ist ebenfalls die Generierung des Trainingsdatensatzes, der, wie bei einer überwachten Klassifikation üblich, manuell erstellt werden muss. Den größten Vorteil zieht dieser Ansatz sicherlich aus der geringen Punktdichte, die für die Modellbildung angenom-

men wird. So können leicht größere Gebiete abgedeckt werden, da LIDAR-Daten mit geringer Punktdichte oft großflächig vorhanden sind.

Anders als die zuvor genannten Ansätze, verarbeiten Huang u. a. (2011) nur LIDAR-Daten und keine zusätzlichen Informationen, wie beispielsweise Kataster- oder OpenStreetMap-Daten. Wie bei Lafarge u. a. (2008) wird ein RJMCMC-Verfahren eingesetzt, hier jedoch nicht, um einfache Geometrien (z.B. Rechtecke) in den Daten zu finden, sondern um die Auswahl der Dachprimitive aus einer zuvor definierten Primitivenbibliothek und die Stichproben für die entsprechenden Parameter der Modelle zu finden.

Dachprimitive werden durch die Parameter Position, Länge, Breite und Form beschrieben. Auffällig an diesen Parametern ist, dass nur rechteckige Modelle definiert werden. Formparameter enthalten Informationen über First- und Traufhöhe, Tiefe möglicher Grate (hips) und die Abweichung des Firsts vom Zentrum des Daches. Gebäudedächer werden als Varianten eines Primitives oder als eine Kombination einer Menge von Primitiven betrachtet. Ein interessanter Ansatz ist hierbei, dass eine Überschneidung von Primitiven erlaubt ist, um mehr Flexibilität in der Rekonstruktion zu ermöglichen.

Abbildung 2.2 zeigt, wie durch das RJMCMC-Verfahren zunächst ein Giebeldach in den Daten gesucht wird. Die lokale Suche verfeinert das Modell von einem halben Walmdach zu einem kompletten Walmdach und beginnt mit der erneuten Suche nach weiteren Primitiven. Diese werden nach einem positiven Treffer mit den bereits gefundenen Primitiven vereinigt.

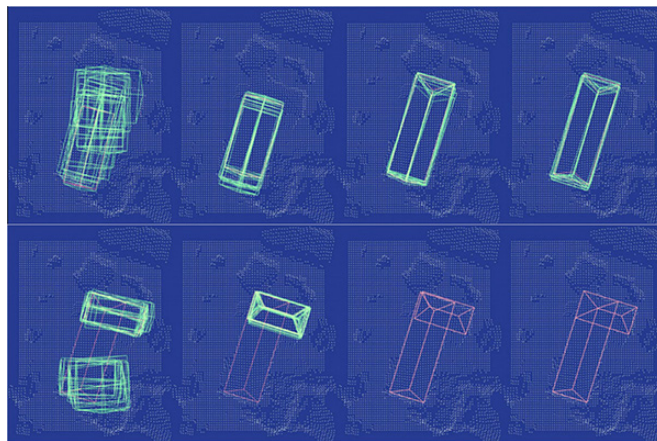


Abbildung 2.2: Beispiel einer RJMCMC-Rekonstruktion (Huang u. a., 2013, angepasst).

Die Ergebnisse des vorgestellten RJMCMC-Verfahrens zeigen in kleinen Gebieten mit einer geringen Anzahl von Gebäuden sehr gute Rekonstruktionen. Wie auch andere Studien deutlich machen, steigt die Detailtiefe der rekonstruierten Modelle mit der Punktdichte (vgl. Kaartinen und Hyyppä, 2006). Schlechte Ergebnisse zeigen sich in größeren Regionen, da die Störungen und die Verteilung der Gebäude sich als zu

komplex für das RJMCMC-Verfahren darstellen.

Hier setzt die Erweiterung von Huang u. a. (2013) an und versucht bessere Ergebnisse durch eine Vorsegmentierung zu erzielen. Größere urbane Szenen werden mit Hilfe einer sogenannten Blob-Detection aufgeteilt und somit effizienter in der eigentlichen Segmentierung verarbeitet. Nachteilig wirkt sich weiterhin aus, dass ein auf RJMCMC basierendes Verfahren niemals die exakt gleichen Ergebnisse liefert, da die Stichproben zufällig gewählt werden und die Begrenzung der Primitivenbibliothek nur planare Dachflächen in der Modellierung berücksichtigt.

### 2.1.2 Datengestützte Ansätze

Der zweite Typ, in den sich Verfahren zur Rekonstruktion von 3D-Stadtmodellen grob unterscheiden lassen, ist ein datengetriebener (data-driven oder bottom-up) Ansatz. Auf diesen Ansatz basierende Verfahren versuchen unspezifizierte Gebäude zu modellieren, ohne diese zuvor in Primitive zu zerteilen. Eine Analyse findet auf der Gesamtheit der Punktwolke eines Gebäudes statt und setzt dieses nicht in Beziehung zu einer vordefinierten Menge von Parametern (vgl. Brenner, 2010, S. 186).

Dies hat gegenüber dem modellgestützten Ansatz einerseits den Vorteil, dass unbekannte Gebäudeformen, je nach Verfahren und zugrunde liegendem Datensatz, gut rekonstruiert werden können. Andererseits sind deformierte Modelle nach der Rekonstruktion möglich, da die Daten Lücken oder Fehler aufweisen können und für gewöhnlich keine vorherigen Annahmen über die Ergebnisse getroffen werden (vgl. Tarsha-Kurdi u. a., 2007).

Vosselman (1999) wendet für einen datengetriebenen Ansatz zur Rekonstruktion von Gebäuden zunächst ein Clustering der Punktwolke und eine Delaunay-Triangulation an, um Dachflächen zu bestimmen. Das Clustering wird über die drei Parameter Steigung in x- und y-Richtung und einem Skalar in der Richtung der Ebenennormalen definiert. Aus den gesammelten Punkten wird eine 2D-Delaunay-Triangulation berechnet. Ein Dreieck gehört nur dann zu einer Fläche, wenn alle drei Punkte innerhalb einer bestimmten Entfernung zur angepassten Ebene liegen. Die Kanten des Gebäudes werden durch Überschneidung der Flächen und einer Analyse von Höhenunterschieden gefunden. Da keine weiteren Daten zur Verfügung stehen und Höhensprünge in Laserdaten schwer zu bestimmen sind, wird eine sogenannte Hauptausrichtung der Gebäude (main building orientation) abgeleitet und als Bedingung für die Kantenausrichtung benutzt. Entstehen Lücken innerhalb eines bestimmten Schwellwertes zwischen den gefundenen Flächen, werden diese geschlossen.

Da dieser Ansatz viele Schwellwerte einführt, die nicht aus den Daten abgeleitet werden, schlagen Vosselman und Dijkman (2001) eine Erweiterung und Verbesserung des Ansatzes vor. Hierfür wird eine 3D-Hough-Transformation zur Extraktion von planaren Flächen eingesetzt. Neben hochauflösenden Laserdaten werden zusätzlich vorhan-



dene Grundrisse von Gebäuden herangezogen. Unter der Annahme, dass die Hough-Transformation im gesamten Untersuchungsgebiet einige falsch detektierte Ebenen liefert, werden die Berechnungen nur innerhalb von Gebäudegrundrissen durchgeführt. Die Grundrisse selber werden wiederum anhand von konkaven Ecken weiter segmentiert, wodurch die Berechnungszeit verringert und die Ergebnisse verbessert werden.

Gefundene Dachflächen werden anhand verschiedener Parameter zusammengefügt oder weiter zerteilt, um homogenere Flächen zu erhalten. Fehler werden hauptsächlich durch eine unzureichende Anzahl von Punkten innerhalb der Grundrisse und eine fehlerbehaftete Segmentierung verursacht, da sich hierbei nicht immer rechteckige Segmente ergeben. Dies ist jedoch eine der Einschränkungen des vorgestellten Ansatzes. Trotzdem werden in Punktwolken mit hoher Auflösung (5–6 Punkte/m<sup>2</sup>) die meisten Dachflächen, teilweise auch Schornsteine, rekonstruiert. Eine Anwendung auf einen Datensatz mit geringerer Punktdichte (1,25–1,5 Punkte/m<sup>2</sup>) liefert, mit Einbußen der Detailtreue, ähnliche Ergebnisse.

Rottensteiner (2003) zeigt einen Ansatz zur Detektion von Flächen in einem LIDAR DSM. Um Flächen zu definieren, werden einheitliche Segmente im DSM durch Interpolation, Filterung und Schwellwerte gefunden. Daraufhin werden homogene Pixel als Seed-Region für einen Region-Growing-Algorithmus gewählt. Übrig gebliebene Pixel werden über einen Vergleich der Nachbarschaftsbeziehung den entsprechenden Flächen zugeteilt. Ein Voronoi-Diagramm stellt hierbei die Beziehung her und fügt die Pixel der nächstgelegenen Region hinzu.

Um Probleme von fehlerhaften Schnittkanten und Überdeckung von beispielsweise benachbarten Bäumen zu beseitigen, schlagen Rottensteiner u. a. (2005) eine Verbesserung des vorherigen Ansatzes durch die Klassifikation und Detektion von Schnittkanten, Sprungkanten (jump edges) und Höhenunterschieden (step edges) vor. Diese Kanten werden anhand von statistischen Tests und robusten Schätzungen berechnet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Umrisse der Dachflächen in einigen Beispielen weiterhin zackenförmig und krumm rekonstruiert werden, jedoch hat sich der Einfluss benachbarter Bäume stark verringert. Hieraus ergibt sich ebenfalls der Vorteil, dass auch Gebäude und Dachflächen ohne rechtwinkligen Grundriss mit diesem Verfahren rekonstruiert werden.

Um die abschließende Anpassung weiter zu verbessern, schlägt Rottensteiner (2006) vor, bestimmte Gebäudeparameter aus den Sensordaten abzuschätzen. Sogenannte Soft-Constraints sollen dabei helfen geometrische Regelmäßigkeiten abzuleiten (vgl. auch Brenner, 2010, S. 192). Als Grundlage der Regeln dienen in diesem Ansatz bisher nur ein Vergleich von Winkel- und Höhenunterschieden zu bestimmten Schwellwerten. Durch diese Vorgaben können im weiteren Verlauf falsche Hypothesen der Rekonstruktion aufgedeckt und beseitigt werden.

Schwalbe u. a. (2005) stellen eine Methode vor, die versucht Strukturen in 3D Punkt-

wolken durch Rotation der Punktdaten in bestimmte Projektionen zu erkennen. Der Gedanke den die Autoren hierbei verfolgen, ist die Simulation des intuitiven Datenhandlings eines Nutzers, der versucht durch Rotation bestimmte Merkmale einer Punktwolke deutlicher darzustellen.

Hierzu wird zunächst die Ausrichtung eines Gebäudes durch eine Height-Histogram-Bin-Analyse bestimmt und anhand des Gebäudeazimuths in die XZ-Ebene projiziert. Es folgt eine zweite orthogonale Projektion in die YZ-Ebene und unter bestimmten Annahmen sollen nun alle Dachflächen als Linien in einer der beiden Projektionen dargestellt werden. Die Linien, die die Dachflächen in der Projektion der Daten repräsentieren, werden mit Hilfe eines Linien-Such-Algorithmus bestimmt. Schneiden sich zwei Linien in dieser Projektion, so entsprechen sie adjazenten Dachflächen.

In einem folgenden Schritt werden alle Punkte, die einer Linie zugeordnet wurden, anhand der Dachneigung rotiert und in die YZ-Ebene projiziert. Die Länge der dabei entstehenden Linie beschreibt auch die Länge der dazugehörigen Dachfläche. Die individuellen Dachflächen werden anhand ihrer benachbarten Flächen verschnitten und kombiniert und bilden so das Dachmodell.

Zur weiteren Verbesserung der vorangehenden Segmentierung und der Hypothesenbildung werden für die Testdaten vorhandene Gebäudegrundrisse eingesetzt. Gute Ergebnisse werden in Wohngebieten mit einer geringen Anzahl von alleinstehenden Gebäuden erreicht, jedoch werden innerstädtische Bereiche vergleichsweise schlecht rekonstruiert. Dies lässt vermuten, dass durch die Projektion wichtige Informationen verloren gehen und in Bereichen mit vielen möglichen Linien diese nicht ausreichend mit den vorgeschlagenen Methoden von einander getrennt werden.

Sohn u. a. (2008) stellen einen Ansatz vor, der auf einem Binary Space Partitioning (BSP) Baum basiert. Der BSP-Baum unterstützt die Rekonstruktion der geometrischen Topologie zwischen adjazenten linearen Merkmalen. Der gesamte Algorithmus beinhaltet mehrere Schritte und beginnt mit dem Auffinden von individuellen Gebäuden in den LIDAR-Daten. Hierfür wird ein Clustering der Laserpunkte anhand von Höhe und planarer Ähnlichkeit durchgeführt. Zusätzlich werden lineare Merkmale wie Schnitt- und Außenkanten extrahiert. Schnittkanten werden anhand der im Clustering beschriebenen Flächen und Außenkanten durch eine Konvexe-Hüllen-Methode und einer Triangulated Irregular Network (TIN) Struktur berechnet. Der BSP-Baum wird hier eingesetzt, um fragmentierte Linienobjekte zwischen adjazenten Dachflächen zu gruppieren. Es findet ebenfalls je nach Verteilung in den Gruppen eine Aufteilung oder Zusammenfügung der Dachflächen statt. Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass der BSP-Baum in der Lage ist, komplexe Gebäudemodelle gut zu repräsentieren.

Ein weiterer Vorteil der hierarchischen Organisation des BSP-Baums ist eine anschließende Generalisierung für Visualisierungen mit unterschiedlichen Detailstufen. Jedoch ist dieser Ansatz stark abhängig von der Liniensextraktion, wodurch eine häufige Fehl-

modellierung kleinerer Dachflächen stattfindet. Da in einigen Regionen die Höhenunterschiede zwischen einzelnen Flächen zu gering sind, werden durch das Clustering nicht alle Dachflächen unterschieden.

Um bekannte Fehler in rekonstruierten Dachformen zu beseitigen, wird von Jwa u. a. (2008) ein Regularisierungsansatz vorgeschlagen und in Sohn u. a. (2012) umgesetzt. Die Linienregularisierung findet in diesem Fall anhand von Orthogonalität, Symmetrie und Vereinfachung statt. Die Regeln werden implizit aus den Daten abgeleitet und die Hypothesen durch das Model Description Length (MDL) Prinzip beschrieben. Nach dieser Methode werden topologische Fehler durch die implizite Übernahme der Dachpolygone beseitigt, wodurch eine maximale geometrische Regelmäßigkeit erreicht werden soll. Abbildung 2.3 zeigt, wie diese Regularisierung in der Praxis aussieht. Verzerrungsfehler in 2.3(a) werden durch die MDL-basierte Regularisierung in 2.3(b) behoben.

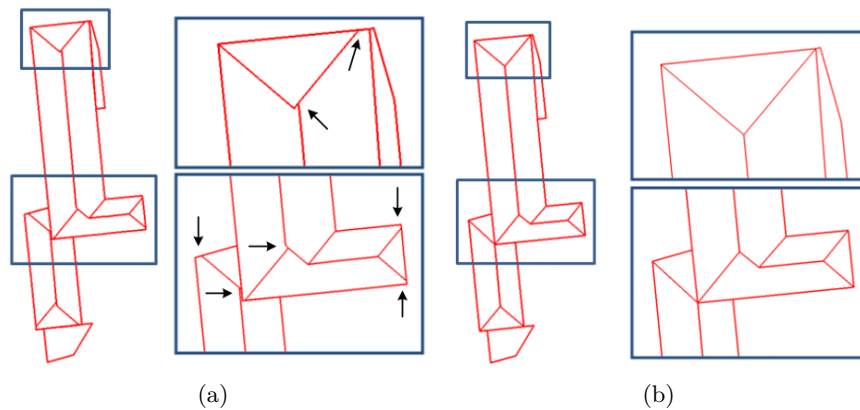


Abbildung 2.3: Formregularisierung einer BSP-basierten Rekonstruktion (Sohn u. a., 2012, angepasst).

Die verbesserten Ergebnisse werden auf den Vaihingen Testdatensatz (vgl. Kap. 5.1) angewendet und zeigen gute Ergebnisse, die berechnete Qualität liegt bei 89% (vgl. Rottensteiner u. a., 2012)). Nachteilig sind weiterhin Gebäude mit runden Elementen, da diese als Liniensegmente extrahiert werden und so bei einigen Gebäuden Fehler verursachen.

Sampath und Shan (2010) zeigen ein Verfahren zur Gebäuderekonstruktion, das über einen Fuzzy k-Means-Algorithmus die Segmentierung der Punktdaten durchführt. Zunächst werden die Eigenwerte aller Punkte berechnet und ein Voronoi-Diagramm erstellt (vgl. Rottensteiner, 2003). Der Fuzzy k-Means-Algorithmus wird nun über die Oberflächennormalen von den generierten Voronoi-Diagrammen zum Clustering von planar liegenden Punkten angewendet. Als Maß der Clusterähnlichkeit werden die Geometrie (euklidische Distanz) und die Topologie (Planarität der Punkte) beachtet. Da der Algorithmus auf der inversen Distanzgewichtung beruht, bekommen Punkte, die näher am Clusterzentrum liegen und planar sind, ein höheres Gewicht zugewiesen und

werden bevorzugt.

Ein Nachteil des Fuzzy k-Means-Algorithmus ist jedoch, dass die Anzahl der möglichen Cluster zuvor bestimmt werden muss. Daher führen die Autoren zusätzlich eine Berechnung ein, die den Merkmalsraum in ein Raster einteilt und das Potential jeder Zelle als Clusterzentrum schätzt. Diese Schätzung basiert hauptsächlich auf der Anzahl der Punkte in dieser Zelle und liefert nicht immer zielführende Ergebnisse. Für die weitere Rekonstruktion wird eine Adjazenzmatrix der gefundenen Dachflächen aufgestellt und überprüft, welche Dachsegmente eine Kante teilen.

Ergebnisse dieser Methode zeigen, dass kleinere Flächen durchweg eine geringere Genauigkeit in der Rekonstruktion aufweisen als größere Flächen. Die Berechnung der Eigenwerte zeigt großes Potential für die Unterscheidung von planaren und nicht planaren Punkten, somit kann beispielsweise der Einfluss von benachbarten Bäumen auf die Segmentierung verringert werden.

### 2.1.3 Hybride Ansätze

In der Praxis werden Ansätze in Kombination und mit fließendem Übergang eingesetzt, eine deutliche Abgrenzung von modell- und datengestützten Verfahren ist daher nicht immer möglich. Diese Verfahren werden dementsprechend auch hybride Ansätze genannt (vgl. Brenner, 2010; Huang u. a., 2013). Bei Sohn u. a. (2008) werden beispielsweise Informationen hauptsächlich aus LIDAR-Daten gewonnen, zusätzlich wird der Methode a priori Wissen der zu erwartenden Gebäudemodelle mitgeteilt. Auch Oude Elberink und Vosselman (2009) kombinieren beide Ansätze (vgl. Kap. 2.2) und sobald der modellgestützte Ansatz nicht ausreicht, um ein Gebäude zu rekonstruieren, wird ein datengestützter Ansatz für die weitere Verarbeitung angewendet. Die nötigen Informationen werden hierzu aus den Daten abgeleitet.

Lafarge und Mallet (2012) stellen ebenfalls einen hybriden Ansatz vor. Hier wird zunächst die Punktwolke mittels einer unüberwachten Klassifikation in die vier Klassen Boden, Gebäude, Vegetation und Ausreißer eingeteilt. Ein folgender Schritt extrahiert geometrische Primitive, zum Beispiel 3D Liniensegmente, Flächen oder Zylinder aus den als Gebäude klassifizierten Punktdaten. Aus dieser gewonnenen Information wird eine planimetrische Karte durch eine Energie-Minimalisierungs-Formulierung bestimmt. Abschließend werden die urbanen Objekte durch Vorlagenanpassungen (engl. *template fitting*) und Gittererzeugung (engl. *meshing procedures*) dreidimensional konstruiert.

Abbildung 2.4 zeigt zwei Ergebnisse dieser Rekonstruktion. Im oberen Teil wird ein einfaches Gebäude mit umgebener Vegetation und im unteren Teil ein komplexes Gebäude mit außergewöhnlichen Dachformen rekonstruiert.

Die Methode erstellt aus Punktwolken mit hoher Auflösung gute Gebäudemodelle, bei geringerer Punktdichte stellt sich das Verfahren jedoch als nicht generisch genug heraus. Ein Vorteil der vorgestellten Methode ist die komplette Beschreibung von ur-

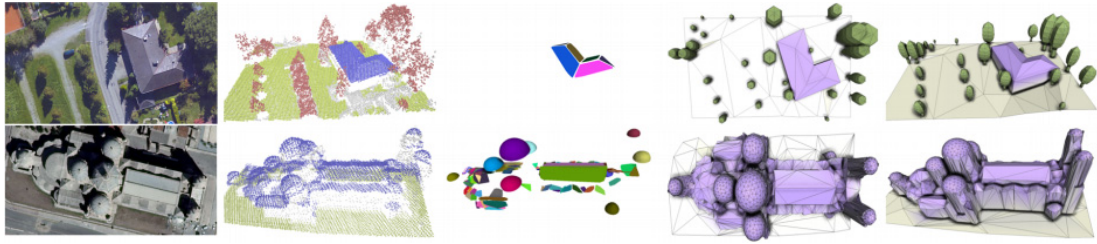


Abbildung 2.4: Ergebnisse einer hybriden Rekonstruktion mit (links) Luftbild und der klassifizierten Punktwolke, (mitte) den extrahierten Oberflächenprimitive und (rechts) Ansichten der 3D Repräsentation (Lafarge und Mallet, 2012, angepasst).

banen Szenen, inklusive Gebäude, Bäumen und komplexeren Bodenstrukturen. Mit diesem Verfahren ist es so möglich, sehr große Szenen mit hohem Informationsanteil und geringem Aufwand zu erstellen.

## 2.2 Graphenbasierte Gebäuderekonstruktion

Wie in Abschnitt 2.1 erläutert, existieren viele Ansätze zur Rekonstruktion von 3D-Gebäudemodellen. In diesem Abschnitt wird eine spezielle Klasse von Verfahren näher vorgestellt, die einen graphenbasierten Ansatz zur Erkennung von Dachformen nutzen. Die im Folgenden dargestellten Methoden basieren meist auf einem modellgestützten Ansatz. Ziel ist es, aus einer Punktwolke einen Graphen zu bilden, der pro Gebäudedach die topologischen Beziehungen der enthaltenen Dachflächen untereinander modelliert. In einem nachfolgenden Schritt wird versucht, den topologischen Graph in Teilgraphen, die Dachprimitive repräsentieren, zu zerlegen. Diese Teilgraphen werden anhand einer zuvor definierten Primitivenbibliothek klassifiziert und daraufhin rekonstruiert.

Abbildung 2.5 zeigt beispielhaft den Ablauf des Teilgraph-Matching-Algorithmus von Oude Elberink (2010). Schnittkanten (intersection lines) und Dachprimitive (target shapes) werden durch Zielgraphen (target graphs) repräsentiert. In diesem Fall werden insgesamt vierzehn Teilgraphen mit vier unterschiedlichen Typen identifiziert.

Ameri und Fritsch (2000) stellen ein Verfahren zur Erstellung eines sogenannten Polygon Adjacency Relationship (PAR) Graphen vor. Jedoch basiert dieser Ansatz noch auf reinen Bilddaten und nicht, wie in anderen vorgestellten Verfahren, auf LIDAR-Daten. Die Nachbarschaftsbeziehungen der aus den Bilddaten extrahierten Flächen werden über ein Voronoi-Diagramm berechnet. Um die Wechselbeziehung zwischen primitiven 3D-Geometrien zu beschreiben, wird der PAR-Graph erstellt. Außer der generellen Nachbarschaft zwischen Dachflächen und einer „enthalten in“-Beziehung beschreibt der Graph jedoch keine weiteren topologischen Beziehungen. Basierend auf dem PAR-Graph werden adjazente Polygone zusammengefügt, sobald diese eine ähnliche Ausrichtung (bestimmt anhand der Oberflächennormalen) besitzen.

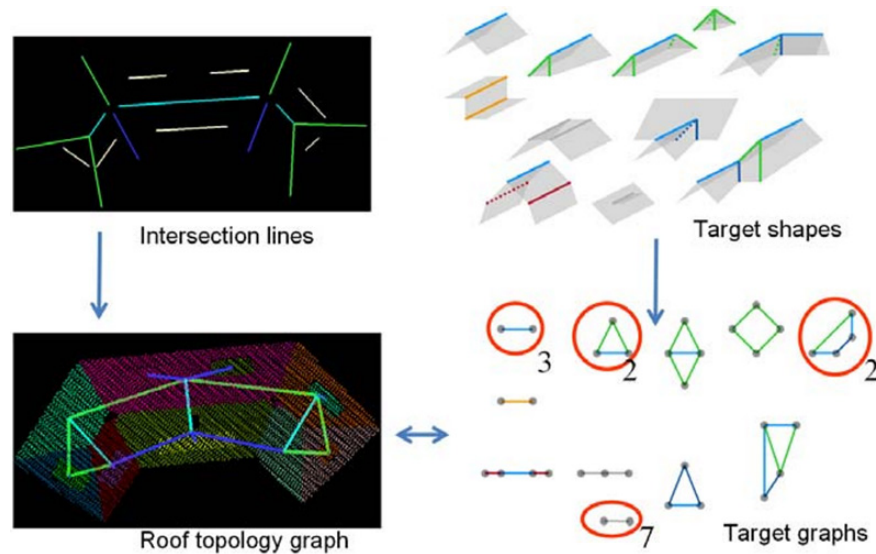


Abbildung 2.5: Teilgraph-Matching-Algorithmus (Oude Elberink, 2010).

Verma u. a. (2006) zeigen in einer grundlegenden Studie einen vollautomatisierten Ansatz auf Grundlage eines sogenannten Dachtopologie-Graphen (roof topology graph, nachfolgend RTG genannt). Zunächst werden Dach- und Geländepunkte durch einen Vergleich der Eigenwerte getrennt und gruppiert. Zusammenhängende Flächen werden anhand eines Entfernungsschwelwerts gefunden und in einem folgenden Schritt mittels eines Ball-Pivoting-Algorithmus in einzelne Dachflächen zerlegt.

Die Dachtopologie wird durch einen Graphen modelliert, wobei jeder Knoten eine Fläche repräsentiert und zwei Knoten nur dann durch eine Kante verbunden werden, wenn auch die entsprechenden planaren Dachflächen eine gemeinsame Schnittkante besitzen. Schnittkanten werden in dieser Methode durch eine bestimmte räumliche Nähe zweier Flächen und einem Schwellwert bestimmt. Zusätzlich erfolgt die Beschriftung der Kanten, die von den Normalen der adjazenten Polygone abhängig ist. Hierzu werden die Normalen in die XY-Ebene projiziert und je nachdem, ob sie orthogonal und voneinander abgewendet sind, orthogonal sind und aufeinander zeigen oder, ob sie parallel sind und in unterschiedliche Richtungen zeigen, entsprechend bezeichnet.

Die parametrische Dachkomposition erfolgt anhand simpler Teilgraphen (Dachprimitive), die zuvor festgelegt werden. In diesem Fall werden vier Dachprimitive generiert: ein Flachdach, ein Walmdach, ein Walmdach in L-Form und ein Walmdach in U-Form. Um Uneindeutigkeiten zu vermeiden, wird das Teilgraph-Matching mit absteigender Komplexität ausgeführt. Hierbei wird versucht, die zuvor definierten Zielgraphen im RTG zu finden.

Ein negativer Aspekt des Teilgraph-Matchings ist laut Verma u. a. (2006), dass das Graph-Matching ein NP-vollständiges Problem ist. Sie weisen jedoch darauf hin, dass selbst bei komplexen Gebäuden relativ kleine Graphen zu erwarten sind und daher eine

Brute-Force-Suche durchaus schnell und ausreichend ist.

Nachteilig ist weiterhin die geringe Anzahl von Dachprimitiven. Haala und Kada (2010) erläutern, dass durch eine Erweiterung der Regeln mit horizontalen Segmenten und einer Abschwächung der Orthogonalität zwischen den Segmenten deutlich mehr Dachprimitive erkannt werden könnten. So ist es beispielsweise mit diesem Ansatz ohne Anpassungen nicht möglich, Mansarddächer zu rekonstruieren.

Milde u. a. (2008) und Milde und Brenner (2009) gehen ähnlich wie Verma u. a. (2006) vor. Ebenen werden über die Punktdaten mit dem RANSAC-Verfahren (vgl. Tarsha-Kurdi u. a., 2008) in einer lokalen Nachbarschaft bestimmt. Mit einem Region-Growing-Algorithmus werden zusammengehörige Flächen verbunden.

Die Beschriftung der Kanten wird durch den Vergleich der Flächen erweitert, indem getestet wird, ob der Winkel zwischen diesen konkav oder konvex ist, ob der Steigungswinkel gleich ist und ob die Schnittkante horizontal ist. Zusätzlich werden Attribute wie Parallelität und Orthogonalität in den Graphen vorgehalten. Die Bibliothek für Zielgraphen wird weiterhin durch mehr Gebäudegrundformen und zusätzliche Verbindungsdachformen erweitert. Zur Bestimmung der Teilgraphen wird eine formale, kontextfreie und attributierte Grammatik eingeführt, die ein Dach eindeutig beschreiben soll.

Die deutliche Erweiterung der Bibliothek für Zielgraphen gegenüber Verma u. a. (2006) ermöglicht eine verbesserte Detektion von Dachformen. Auch komplexe Gebäude werden durch die Verbindungsdachformen gut modelliert, weitere Details wie Gauben finden zwar Erwähnung, werden jedoch nicht in der Bibliothek umgesetzt.

Oude Elberink (2009) stellen ein Teilgraph-Matching-Verfahren vor, in dem unter anderem daten- und modellgestützte Ansätze kombiniert und als objektgestützte (object driven) Rekonstruktion bezeichnet werden. Die topologische Repräsentation der häufigsten Dachstrukturen wird auch hier in einer Bibliothek für Zielgraphen definiert. Die topologische Beziehung der Segmente wird über Schnittlinien und Höhensprünge bestimmt, wobei Schnitte zwischen zwei Segmenten durch eine Funktion der Punktabstände der jeweiligen Segmente bestimmt werden. Ein erwähnenswerter Ansatz ist, dass Parameter und Schwellwerte immer lokal aus den Daten abgeleitet werden. Es werden keine Vorannahmen über einen Datensatz getroffen oder andere Schwellwerte definiert.

Es werden insgesamt sieben Typen für die räumliche Beziehung der sich schneidenden Segmente vorgestellt, die in den entsprechenden Kanten des RTG gespeichert werden. Wie bei Verma u. a. (2006) werden hierfür hauptsächlich die Normalen der Segmente verglichen, jedoch werden zusätzlich horizontale Kanten, Kanten, die innerhalb eines anderen Segments liegen und Höhensprünge definiert. Die Bibliothek ist umfangreich und besteht aus insgesamt zwölf Zielgraphen, die Grundformen wie Giebel- oder Walmdach, aber auch Gauben und andere kleinere Teilformen von Dächern beschreiben.

Oude Elberink und Vosselman (2009) zeigen, wie dieses Verfahren zusätzlich dazu

eingesetzt wird, um komplette Treffer automatisch zu rekonstruieren und nur teilweise gefundene Dachbereiche aufzuzeigen, die für eine mögliche manuelle Bearbeitung in Betracht kommen. Da die Punktdichte der eingesetzten Daten sehr hoch ist und für die Segmentierung Gebäudegrundrisse herangezogen werden, sind die Rekonstruktionen in vielen Bereichen gut umgesetzt. Im Gegensatz zu anderen Verfahren sind Gauben und Höhengsprünge im RTG berücksichtigt, daher ist die Detailtreue der rekonstruierten Dächer entsprechend hoch.

Lücken in den Laserdaten und eine fehlerbehaftete Segmentierung führen jedoch auch in diesem Verfahren zu Fehlern und vor allem zu nicht identifizierten Teilgraphen. Daher schlagen Xiong u. a. (2014) weitere Verbesserungen dieses Verfahrens vor. Die Bibliothek für Zielgraphen wird weiter generalisiert und erweitert, wodurch zusätzliche Dachformen erkannt werden. Die eigentliche Verbesserung liegt jedoch in der Einführung einer automatischen Korrektur von RTG.

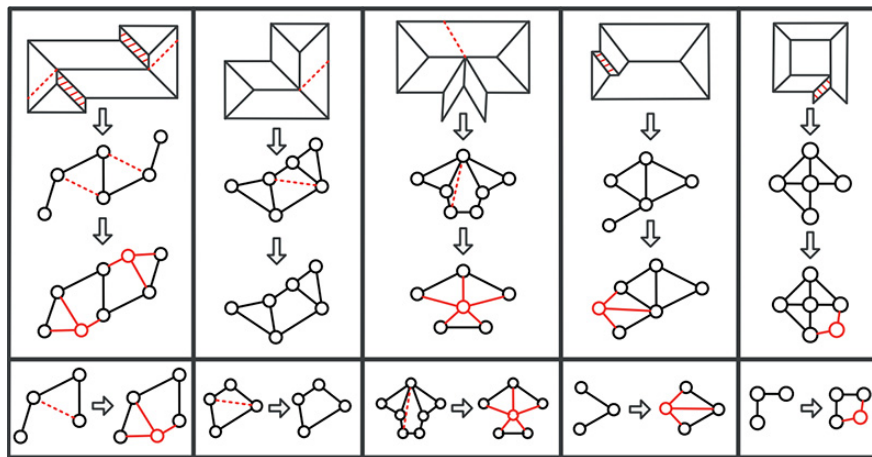


Abbildung 2.6: Bearbeitungsverzeichnis für Dachtopologiegraphen (Xiong u. a., 2014).

So sollen typische und häufig auftretende Fehler in der Dachtopologie durch Hinzufügen oder Entfernen von Knoten und Kanten ausgebessert werden. Hierfür wird ein sogenanntes Bearbeitungsverzeichnis (graph edit dictionary) für RTG eingeführt. Über einen iterativen Prozess wird ein RTG auf bestimmte Fehler untersucht und solange ausgebessert, bis alle Teilgraphen durch die Bibliothek für Zielgraphen erklärt werden können. Abbildung 2.6 zeigt beispielhaft, wie ein Bearbeitungsverzeichnis aussehen kann. Die rot gestrichelten Linien stellen falsche Schnittkanten im Gebäudemodell und im RTG dar. Die roten Kreise und Linien zeigen neu erzeugte Knoten und Kanten im RTG. Die automatische Fehlerbehebung kann die vorherigen Ergebnisse verbessern und führt jeweils in Datensätzen mit geringer Punktdichte (4 Punkte/m<sup>2</sup>) und hoher Punktdichte (60 Punkte/m<sup>2</sup>) zu guten Ergebnissen. Innere Dachkanten werden, wie auch in anderen Verfahren gezeigt, weiterhin deutlich besser erkannt als Dachaußenkanten.

Einen weiteren datengestützten Ansatz stellen Perera u. a. (2012) vor. Sie erweitern



die graphenbasierte Rekonstruktion von Dächern durch die Suche nach geschlossenen Zyklen aus der Graphentheorie in den entsprechenden topologischen Graphen. Die Segmentierung der LIDAR-Daten erfolgt wie bei Vosselman u. a. (2004) anhand einer 3D-Hough-Transformation. Auch hier werden die Segmente durch Knoten repräsentiert und die topologischen Beziehungen zweier Knoten durch eine Kante.

Die Topologie wird anhand von Schnittkanten und Höhengsprüngen (step edges) bestimmt und wie bei Oude Elberink und Vosselman (2009) durch lokale Entfernungsschwellwerte berechnet. Jedoch werden Schnittkanten, wie bereits zu Verma u. a. (2006) erläutert, nicht weiter klassifiziert, es werden demnach nur zwei Typen von Kanten in den RTG unterschieden. Ein angepasster Dijkstra-Algorithmus wird angewendet, um kürzeste geschlossene Zyklen im RTG zu finden und dementsprechend aufzuteilen. Da alle Schnittkanten eines Zyklus in einem Punkt konvergieren, bilden sie an dieser Stelle eine Dachecke. Fehler- und lückenhafte Dachkanten können demnach ohne eine Primitivenbibliothek durch eine gewichtete Methode der kleinsten Quadrate angepasst werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass Kanten innerhalb eines Daches gut erkannt werden, äußere Kanten, zum Beispiel die Traufe, werden jedoch nicht immer einwandfrei rekonstruiert (vgl. Xiong u. a., 2014). Lücken in den LIDAR-Daten und eine fehlerbehaftete Segmentierung verursachen auch hier fehlende Kanten im RTG und dadurch weiterhin Fehler in der Rekonstruktion.

Zusammenfassen lässt sich, dass die graphenbasierte 3D-Gebäuderekonstruktion ein aktuelles Forschungsfeld ist. Vorteile sowie Nachteile der jeweiligen Ansätze sind deutlich geworden. So haben Graphen den Vorteil eines einfacheren Handlings im Gegensatz zu Geometrien. Das Finden von Dachprimitiven wird im modellgestützten Ansatz auf ein Teilgraph-Matching reduziert. Dies ist zwar NP-vollständig (vgl. Verma u. a., 2006), jedoch sind die zu erwartenden Graphen relativ klein und daher mit einem Brute-Force-Ansatz in adäquater Geschwindigkeit zu lösen. Nachteilig ist weiterhin der Aufbau der Bibliothek für Zielgraphen, da von dieser abhängt, welche Dachformen bei der Rekonstruktion beachtet werden.

Ansätze, die diesen Kritikpunkt abschwächen, zeigen Oude Elberink (2009), Xiong u. a. (2014) und Perera u. a. (2012). Eine Gemeinsamkeit vieler Ansätze ist die Beschreibung der räumlichen Beziehung von sich schneidenden Dachflächen, die durch die Beschriftung der Kanten ausgedrückt wird. Interessant bleibt daher die Untersuchung von unterschiedlichen Regeln, um eine möglichst generelle Beschreibung der Topologie in einem RTG zu ermöglichen.

## 3 Graphenbasierte Erkennung von Dachformen

Der in dieser Arbeit verfolgte Ansatz der graphenbasierten Erkennung von Dachformen setzt sich, wie in Kapitel 2.2 gezeigt, aus mehreren Schritten zusammen. Abbildung 3.1 zeigt den groben Ablauf, der in den nachstehenden Abschnitten im Detail erläutert wird, wobei nur die weiß hinterlegten Flächen Teil dieser Arbeit sind. Die grau hinterlegten Flächen beschreiben einerseits wichtige Vorprozessierungen, wie die Segmentierung der 3D-Punktwolke und andererseits das eigentliche Ziel dieser Bemühungen, die automatische Rekonstruktion von 3D-Gebäuden.

Die Segmentierung wird mithilfe verschiedener Parameter eingesetzt, um möglichst planare und zusammengehörige Flächen aus einer Punktwolke zu extrahieren (vgl. Kap. 3.1). Aufgrund dieser Flächen werden nachfolgend die Schnittkanten berechnet (vgl. Kap. 3.2), die wiederum durch bestimmte Eigenschaften dabei helfen, die topologische Graph-Modellierung durchzuführen. Durch bestimmte Parameter werden diese Kanten typisiert und bilden ein topologisches Graph-Modell (vgl. Kap. 3.3). In einer Bibliothek für Zielgraphen werden zuvor definierte Dachformen vorgehalten (vgl. Kap. 3.4) und kommen im nächsten Schritt, dem Teilgraph-Matching, zum Einsatz (vgl. Kap. 3.5). Sobald das Teilgraph-Matching eines Zielgraphen im topologischen Graph-Modell zutrifft, ist ein Abschnitt der Dachform definiert und kann im weiteren Verlauf der 3D-Gebäuderekonstruktion verwendet werden.

### 3.1 Segmentierung

Die Segmentierung der Punktwolke wird über einen Surface-Growing-Algorithmus realisiert. Dieser Algorithmus entspricht dem Region-Growing-Algorithmus im Bildraum (vgl. Vosselman u. a., 2004) und versucht Punkte zu gruppieren, die beispielsweise eine räumliche Nähe zueinander oder andere Gemeinsamkeiten aufweisen. Dieser Ansatz basiert im Grunde auf drei Schwellwerten, die bestimmen, ob ein Punkt zu einer Fläche gehört, oder nicht.

Der Entfernungsschwellwert bestimmt einerseits, wie weit ein neuer Punkt maximal entfernt sein darf von allen zuvor definierten Segmentpunkten und andererseits wie weit entfernt der Punkt zur aktuell zu segmentierenden Ebene liegen darf. Der Winkel-Schwellwert bestimmt, wie groß der Winkel-Unterschied maximal zwischen den

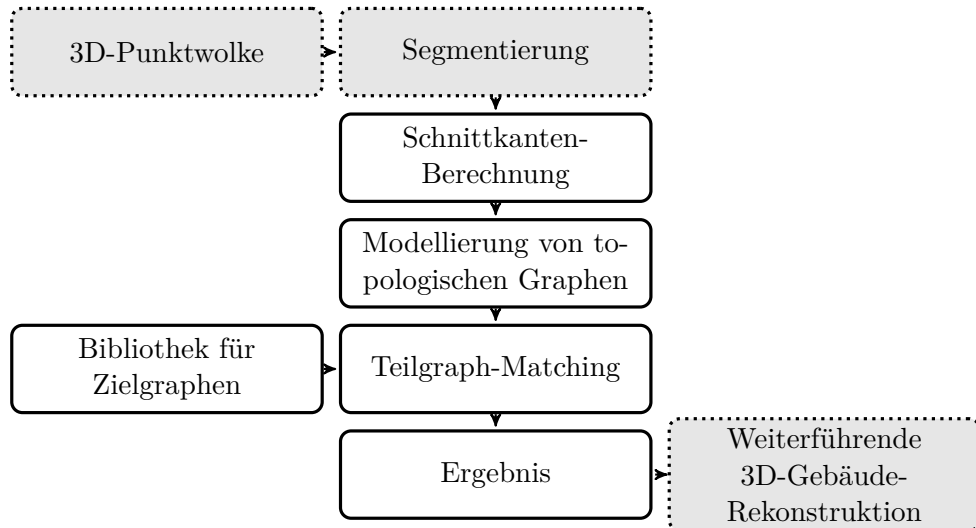


Abbildung 3.1: Ablaufdiagramm des Teilgraph-Matching-Algorithmus.

einzelnen Iterationen der Segmentfläche sein darf, damit der Punkt der aktuellen Iteration hinzugefügt wird.

Wie Oude Elberink (2009) erläutert, hängen automatisierte Gebäuderekonstruktionsverfahren stark von der Segmentierung ab. Durch die Schwellwerte kann ein bestimmter Grad an Vorwissen des Datensatzes daher von Vorteil sein und das Ergebnis verbessern, wodurch jedoch ein manueller Eingriff vorgenommen wird.

Aufkommende Fehler bei Segmentierungsmethoden im Allgemeinen sind laut Pu und Vosselman (2009) hauptsächlich Über- und Untersegmentierung, also die Einteilung der Punktwolke in eine zu große oder zu geringe Anzahl von Flächen und die Einteilung in für die Gebäuderekonstruktion irrelevante Objekte (z.B. Autos).

## 3.2 Schnittkantenberechnung

Die Bestimmung der Topologie zweier Dachflächen erfolgt in dieser Arbeit anhand der Berechnung der Schnittkanten zwischen den jeweiligen von den Segmenten definierten Ebenengleichungen. Die Länge und Anzahl der Schnittkanten wird durch die Punkte der Segmente und verschiedene Parameter bestimmt. Eine Schnittkante wird nur dann aufgenommen, wenn

1. Punkte von beiden Segmenten innerhalb eines bestimmten senkrechten Abstandes zur Schnittlinie eingeschlossen werden (*Within Perpendicular Distance*)
2. der maximale fortlaufende Abstand zwischen zwei Punkten einen Schwellwert nicht überschreitet (*Maximum Consecutive Point Distance*)

Zusätzlich wird eine sogenannte *Combine-Operation* eingesetzt, um drei mögliche Ansätze zu verfolgen:

1. *Maximale Ausdehnung (Maximum Extent)*: Lässt die Berechnung der maximalen fortlaufenden Punktdistanz aus und gibt die maximale Ausdehnung der Schnittkante zurück.
2. *Boolesche Vereinigung (Boolean Union)*: Führt eine boolesche Vereinigungsoperation auf den gefundenen Schnittkanten aus und gibt diese zurück.
3. *Boolesche Schnittmenge (Boolean Intersection)*: Führt eine boolesche Schnittoperation aus und versucht möglichst übereinstimmende Schnittkanten zu finden und zurückzugeben.

Abbildung 3.2 zeigt, wie sich die unterschiedlichen Operationen auf das Ergebnis der Schnittkantenberechnung auswirken.

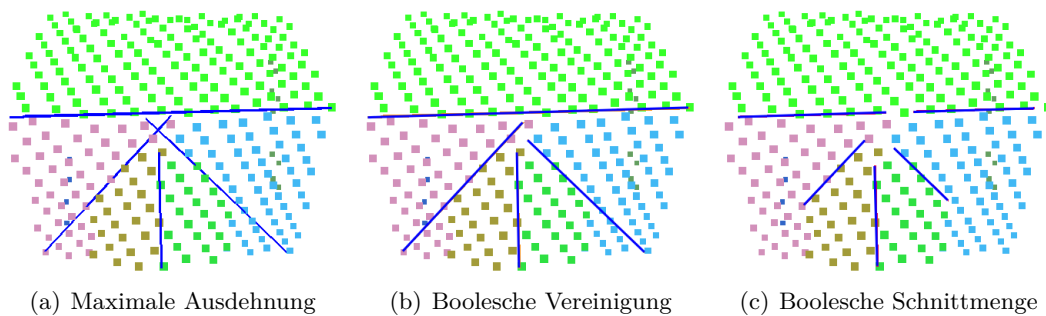


Abbildung 3.2: Auswirkungen verschiedener Schnittkantenberechnungsoperationen.

Die Operation *Maximale Ausdehnung* in Teilabbildung 3.2(a) verdeutlicht, wie das Überspringen der Berechnung der maximalen fortlaufenden Punkte zu Überschneidungen und überlangen Kanten führt. Schneiden sich zwei ungleich lange Dachflächen, wird eine zu lange Schnittlinie erzeugt (Abb. 3.3(a)).

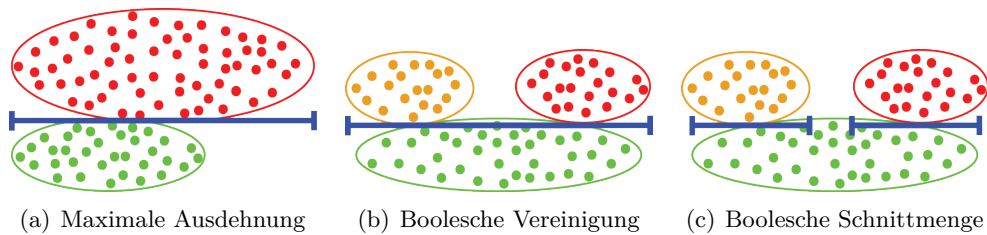


Abbildung 3.3: Berechnung der Schnittkantenlänge bei verschiedenen Operationen.

*Boolesche Vereinigung* führt als Operation zu kompakten Schnittkanten (Abb. 3.2(b)), erzeugt jedoch, ähnlich wie die maximale Ausdehnungsoperation bei nahegelegenen Dachflächen, zu lange Schnittkanten (Abb. 3.3(b)).

Die *boolesche Schnittmenge* zeigt häufig Unterbrechungen und bringt kurze Linien hervor (Abb. 3.2(c)). Diese Operation kommt der strikten Definition eines Schnitts am nächsten (Abb. 3.3(c)).

### 3.3 Erstellung von topologischen Graphen

Im Anschluß an die Berechnung der Schnittkanten folgt die Erstellung der topologischen Graphen der einzelnen Gebäude (engl. *roof topology graph*). Wie in Verma u. a. (2006) erläutert, repräsentiert jeder Knoten eine planare Dachfläche und zwei Knoten teilen sich nur dann eine Kante, wenn sich auch die entsprechenden Segmente eine Schnittkante teilen. Die zuvor berechneten Schnittkanten beschreiben nicht nur die Grenzen der sich schneidenden Segmente, sondern auch ihre Nachbarschaftsbeziehungen zueinander (vgl. Oude Elberink, 2009, Kap. 3.2). Hierzu werden sieben verschiedene Typen von topologischen Beziehungen zwischen sich schneidenden Segmenten deklariert (vgl. Oude Elberink, 2009; Verma u. a., 2006). Die Schnittkantentypen dienen in diesem Fall als Label der einzelnen Kanten des Graphen. Eine Beschreibung der in dieser Arbeit eingesetzten Label und beispielhafte Vorkommen in Dachformen sind in Tabelle 3.1 aufgelistet.

Tabelle 3.1: Aufteilung der Schnittkantentypen.

Label	Beschreibung	Vorkommen
Ridge (R)	Zumeist horizontale Schnittkante zwischen zwei Segmenten mit entgegengesetzten Normalen	First bei Giebel- und Walmdach
Horizontal Ridge (HR)	Horizontale Schnittkante zwischen einer horizontalen und einer geneigten Dachfläche	Mansarddach
Horizontal Valley (HV)	Zumeist horizontale Schnittkante zwischen zwei geneigten Dachflächen mit zugewandten Normalen	Schmetterlings- oder Sheddach
Horizontal Slope (HS)	Schnittkante zwischen zwei geneigten Segmenten mit Normalen, die in dieselbe Richtung zeigen	Mansardgiebel-dach oder Schleppgaube
Hip (H)	Schräge und konvex zueinander stehende Segmente	Grat bei Walmdach und Pyramiden
Valley (V)	Schräge und konkav zueinander stehende Segmente	Kehle bei Giebel- oder Spitzgaube
No Match (NO)	Keine Bedingung trifft zu	-

Die Bestimmung erfolgt hauptsächlich über einen Vergleich der Normalen der benachbarten Segmente. Hierbei werden die Normalenvektoren auf die XY-Ebene projiziert (vgl. Verma u. a., 2006). Das Kreuzprodukt der Normalen zeigt, ob diese parallel zueinander stehen und über den Winkel kann bestimmt werden, ob sie in dieselbe Richtung zeigen. Aufgrund von vorhersehbaren Ungenauigkeiten, zum Beispiel durch die Laserdaten selber und durch eine nicht optimale Segmentierung, werden Schwellwerte für einen bestimmten Toleranzbereich eingesetzt. So wird beispielsweise davon ausgegangen, dass

Segmente in dieselbe Richtung zeigen, wenn der Winkel zwischen den Normalen  $\leq 45^\circ$  beträgt. Im entgegengesetzten Fall muss der Winkel  $\geq 135^\circ$  und  $\leq 215^\circ$  betragen, damit die Kante als *First* gelabelt wird.

Die Berechnung der Konvexität und Konkavität wird jeweils über die Ebenengleichung zweier benachbarter Segmente gelöst. Es werden nacheinander die Punkte des ersten Segments in die Ebenengleichung des zweiten Segments eingesetzt, bis ein Punkt gefunden wird, der vor der Ebene liegt (*Ergebnis*  $> 1$ ). Dies wird entgegengesetzt mit den Punkten des zweiten Segments und der Ebenengleichung des ersten Segments wiederholt. Wird in beiden Fällen ein Punkt eines Segments gefunden, der vor der jeweiligen Ebene des anderen Segments in einem bestimmten Schwellwert liegt, wird die Schnittkante als konkav deklariert, andernfalls als konvex.

Um zu prüfen, ob eine Dachfläche horizontal ist, wird der Winkel zwischen den unprojizierten Normalen und der X-Achse berechnet. Eine Kehle wird durch zwei konkav zueinander stehende Segmente bestimmt, jedoch trifft dies auch bei einem Schmetterlings- oder Sheddach zu. Daher muss zusätzlich berechnet werden, ob eine Schnittkante horizontal liegt. Dies wird ebenfalls über eine Winkelbestimmung zwischen X-Achse und Schnittkante gelöst.

Das Ergebnis dieser Bemühungen sind topologische Graphen, die durch adjazente Beziehungen zwischen den jeweiligen Segmenten eines Daches beschrieben werden. Wie in Kapitel 2 erläutert, können häufig auftretende Muster unabhängig von der Geometrie erkannt werden. Sie sind topologisch invariant gegenüber Transformationen wie zum Beispiel Drehungen, Streckungen oder Stauchungen (vgl. de Lange, 2013, S. 137) und können so durch die Aufstellung von einheitlichen Regeln oder einer Grammatik (vgl. Milde und Brenner, 2009) beschrieben werden.

Abbildung 3.4 zeigt, wie die Entwicklung eines topologischen Graphen für ein komplexeres Gebäude in der Praxis aussehen kann. Aus der Punktwolke werden Segmente generiert (Abb. 3.4(a)), die miteinander verglichen werden, um Schnittkanten zu berechnen (Abb. 3.4(b)). Diese Kanten werden anhand der adjazenten Beziehung der entsprechenden Segmente zueinander gelabelt und als Graph modelliert, wobei jedes Segment durch einen Knoten und jede Schnittkante durch eine Kante des Graphen repräsentiert wird (Abb. 3.4(c)). Die Farben der Kanten entsprechen dabei den in Tabelle 3.1 gezeigten Typen (rot = Kehle, grün = First, blau = Grat).

## 3.4 Bibliothek für Zielgraphen

Für das nachfolgende Teilgraph-Matching ist es notwendig, eine Datenbank mit entsprechenden Datensätzen zu füllen. Die Datensätze entsprechen Zielgraphen in einer Bibliothek (engl. *target graph library*), die die Topologie von zuvor bestimmten Dachformen oder Teile davon modellieren. Häufig auftretende Dachprimitive werden aus dem

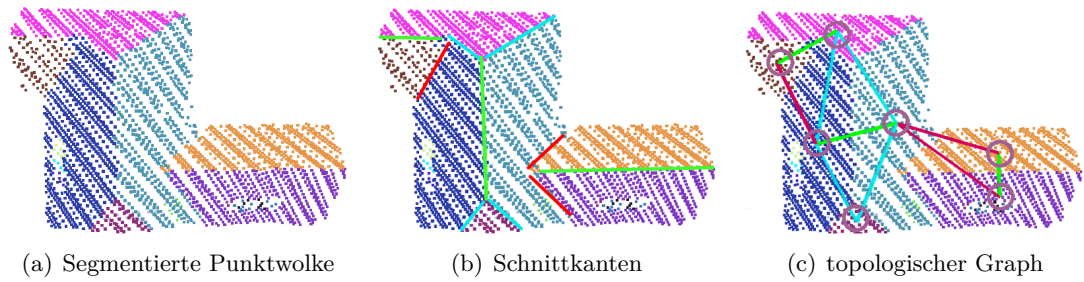


Abbildung 3.4: Entwicklung eines topologischen Graphen.

Vaihingen-Datensatz (vgl. Kap. 5.1) extrahiert und entsprechende topologische Graphen als Regelsatz formuliert. Hierdurch entsteht ein Regelwerk von mehreren Grunddachformen und häufiger auftretenden Gaubenarten (vgl. Tabelle 3.2). Wie in Kapitel 2.2 deutlich wird, sind diese Dachtypen häufig als Referenz für Dachprimitive aufzufinden (vgl. Huang u. a., 2011; Milde u. a., 2008; Oude Elberink, 2009; Verma u. a., 2006) und liefern in den dort verwendeten Datensätzen plausible Ergebnisse.

Es ist möglich, dass diese Teilgraphen in den topologischen Graph-Modellen mehrmals auftreten. Daher wird ein komplexes Gebäude durch eine Aufteilung in mehrere kleinere Teilgraphen beschrieben. Abbildung 3.5 zeigt, wie eine komplexe Dachtopologie in einzelne Teilgraphen unterteilt wird. In diesem Beispiel wird ein Walmdach (rot) mit zwei anhängenden Giebeldächern (blau) erkannt. Bei genauerer Betrachtung fällt auf, dass die Teilgraphen der Giebeldächer nicht dem Zielgraph aus Tabelle 3.2 entsprechen. Dies lässt sich auf die jeweiligen Regelwerke zurückführen, die im nachfolgenden Abschnitt 3.5 erläutert werden.

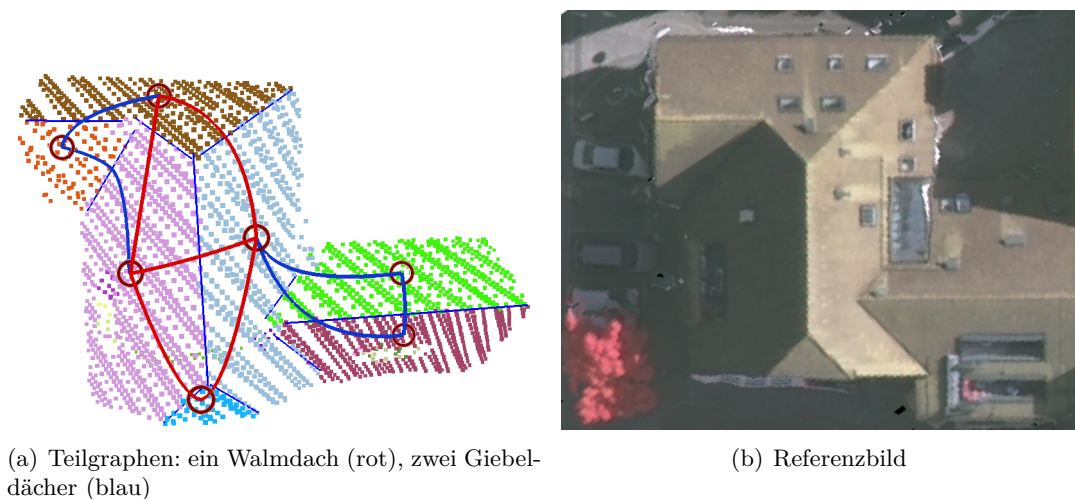

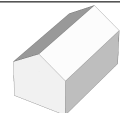

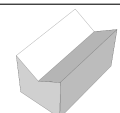
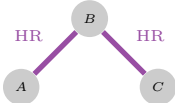
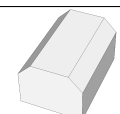
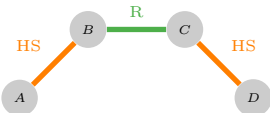
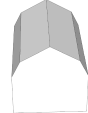
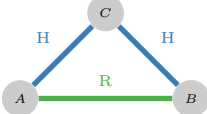
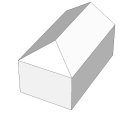
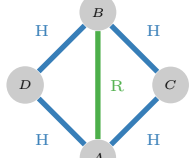
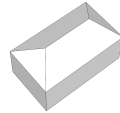
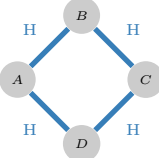
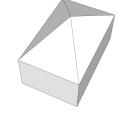
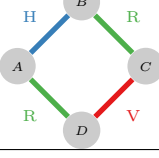
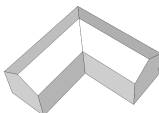


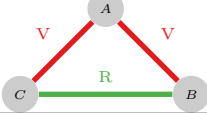


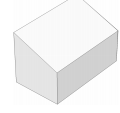


Abbildung 3.5: Aufteilung einer komplexeren Dachtopologie.

Tabelle 3.2: Bibliothek für Zielgraphen.

Beschreibung	Zielgraph	Abbildung
Sattel- oder Giebeldach (Gable roof)		
Schmetterlings- oder Sheddach (Valley)		
Mansarddach (Mansard)		
Mansardgiebeldach (Gambrel)		
Halbes Walmdach (Half Hip)		
Walmdach (Hip)		
Pyramiden- oder Zeltdach (Pyramid)		
L-Dachform (L-shaped roof)		
Schleppgaube (Sheddormer)		
Giebel- oder Spitzgaube (Gabledormer)		
Flach- oder Schrägdach (Flat or Shed roof)		



### 3.5 Teilgraph-Matching

Das Teilgraph-Matching verknüpft die Referenzdaten mit den topologischen Graph-Modellen aus der 3D-Punktwolke. Wie in Kapitel 2.2 erläutert, handelt es sich beim Teilgraph-Matching um ein NP-vollständiges Problem, es kann daher mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht effizient gelöst werden. Dies beschreiben auch Verma u. a. (2006), erläutern jedoch, dass die zu erwartenden Graph-Modelle recht klein bleiben, demnach ein Brute-Force-Ansatz relativ schnell und ausreichend für das hier vorgestellte Teilgraph-Matching ist. Um sicherzustellen, dass der komplexe topologische Graph in so viele Teilgraphen unterteilt wird, wie durch die Zielgraphen beschrieben werden kann, erfolgt das Matching in absteigender Komplexität der Zielgraphen.

Die folgenden Paragraphen beschreiben die Regeln, die für das Teilgraph-Matching der in Tabelle 3.2 dargestellten Zielgraphen eingesetzt werden. Trifft eine der Regeln nicht zu, wird zunächst davon ausgegangen, dass das Matching für den entsprechenden Zielgraph fehlgeschlagen ist. Demnach erfolgt ein Matching mit einem weniger komplexen Zielgraph. Trifft ein Matching zu, werden die entsprechenden Kanten mit dem zugehörigen Typen gelabelt und vom weiteren Matching ausgenommen. Neben der Regulierung durch die Nachbarschaftsbeziehung der Schnittkantentypen (vgl. Tab. 3.1) werden zusätzliche Beschränkungen eingeführt, um ein möglichst exaktes Teilgraph-Matching der einzelnen Zielgraphen in den topologischen-Graphen zu realisieren. Unter anderem werden hierfür Alpha-Shapes, Punkt-in-Polygon-Tests, Bounding Boxen, Vergleiche der Schnittlinienlängen und Schwellwerte vorgestellt. Ein Großteil der Schwellwerte wird unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Daten ermittelt, indem beispielsweise in bestimmten Ausschnitten der digitalen Luftbilder die Firstlängen der Dachformen gemessen und gemittelt werden. Die im Folgenden eingesetzten Abkürzungen und Begriffe können direkt aus den Tabellen 3.1 und 3.2 entnommen werden.

**Walmdach (hip roof):** Ein Walmdach besteht aus exakt vier Knoten, wobei die Knoten A und B über eine R-Kante verbunden sind. Die zwei übrigen Knoten D und C sind jeweils durch zwei ausgehenden H-Kanten mit den Knoten A und B verbunden (vgl. Tab. 3.2). Eine weitere Regel betrifft die Länge der Schnittlinie der R-Kante, welche mindestens 3 m betragen muss.

Zusätzlich wird die Distanz zwischen den Schnittlinien der R-Kante und denen der H-Kanten überprüft und darf dabei einen Schwellwert von 1 m nicht überschreiten. So wird beispielsweise eine mögliche Fehlklassifikation, wie in Abbildung 3.6 gezeigt, vermieden. Eine vorgelagerte Fläche (außen rechts), mit der gleichen Anzahl an Knoten und H-Kanten, kann als eine Hälfte des Walmdachs erkannt werden, jedoch wird nach diesen Regeln nur die grüne Fläche als Teil des Walmdaches anerkannt, da deren Schnittlinien (blau) an denen der R-Kante zusammentreffen.

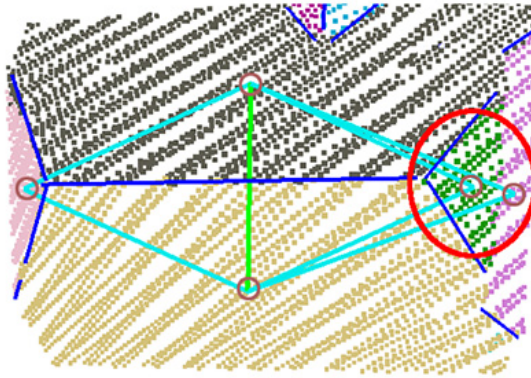


Abbildung 3.6: Mögliche Fehlklassifikation bei einem Walmdach (roter Kreis).

**Mansarddach (mansard roof):** Der Zielgraph eines Mansarddaches besteht aus den drei Knoten A, B und C. Die Knoten A und C sind jeweils über eine HR-Kante mit dem Knoten B verbunden. Neben diesen Einschränkungen wird zusätzlich jeweils die Schnittkantenlänge der HR-Kanten überprüft und muss mindestens 2,5 m betragen.

**Mansardgiebeldach (gambrel roof):** Damit ein Teilgraph als Mansardgiebeldach detektiert wird, muss dieser aus vier Knoten bestehen. Die Knoten B und C repräsentieren einen Dachfirst und sind über eine R-Kante verbunden. Die Knoten A und D modellieren jeweils die seitlichen Dachflächen mit einer steileren Neigung. Somit ist A über eine HS-Kante mit B verbunden und analog D mit C.

Zusätzlich wird überprüft, ob die Schnittlinie der R-Kante mindestens 3 m beträgt und die Schnittlinien der seitlichen Dachflächen nicht merklich größer (Faktor 1,5) beziehungsweise kleiner (Faktor 0,66) sind. Dies verhindert, dass beispielsweise kleinere Schleppegauben auf einem Giebeldach als ganze Dachflächen eines Mansardgiebeldaches erkannt werden.

**L-Dachform (L-Shaped roof):** Eine L-Dachform wird durch vier Knoten A, B, C und D, die einen ungerichteten Kreis bilden, modelliert. Dieser Kreis muss in einer bestimmten Reihenfolge durch verschiedene Kanten verbunden sein. Die Knoten A und B sind durch eine H-Kante verbunden. B stellt mit C eine Verbindung über eine R-Kante her. C ist über eine V-Kante in Beziehung zu D gesetzt. D schließt den Kreis zu A mit einer erneuten R-Kante (vgl. Tab. 3.2).

Um zu überprüfen, ob ein Satteldach der L-Dachform das andere umschließt, werden die Alpha-Shapes aus den dazugehörigen Punkten berechnet. Über einen Punkt-in-Polygon-Test wird mittels eines Schwellwertes bestimmt, ob eine Fläche die andere umschließt. Dies filtert beispielsweise übersegmentierte Giebel- oder Spitzgauben heraus, die ansonsten in Kombination mit einem Giebeldach einen L-Dachform-Teilgraphen erzeugen.

**Pyramidendach (pyramid roof):** Ein Pyramidendach wird wie eine L-Dachform durch vier Knoten, die einen ungerichteten Kreis bilden, beschrieben. Die Knoten des Graphen werden jedoch nur über H-Kanten verbunden (vgl. Tab. 3.2).

Eine Überprüfung auf eine räumliche Nähe der Schnittlinien (alle konvergieren zur Spitze des Daches) oder ein Vergleich der Schnittlinien (alle Kanten weisen die gleiche Länge auf) kann Fehlklassifikationen weiter ausschließen. Auch ein Vergleich der Steigung der einzelnen Flächen ist ein vielversprechender Ansatz (vgl. Xiong u. a., 2014).

**Halbes Walmdach (half hip):** Der Regelsatz für das Matching eines halben Walmdaches ist vergleichbar mit dem Regelsatz eines normalen Walmdaches. In diesem Fall besteht der Zielgraph aus den drei Knoten A, B und C. A und B repräsentieren ein First und sind daher über eine R-Kante verbunden. Der Knoten C ist jeweils über eine H-Kante mit A und B verbunden und bildet so einen ungerichteten Kreis.

Eine Überprüfung des Datensatzes zeigt, dass halbe Walmdächer in der Regel kürzere Dachfirste als normale Walmdächer aufweisen. Daher muss die Schnittlinie der R-Kante zwischen A und B in diesem Fall nur mindestens 2,5 m betragen.

**Sattel- oder Giebeldach (gable roof):** Giebeldächer gehören neben Schleppegauben zu den trivialsten Zielgraphen, da sie aus den zwei Knoten A und B, verbunden durch eine R-Kante, bestehen. Um eine mögliche Fehlklassifikation von Giebeldächern als Giebelgauben zu verhindern, wird zusätzlich die Länge der Schnittlinie der entsprechenden Segmente überprüft. Die Länge muss mindestens 3 m betragen, um Gauben, deren Firste in der Regel kürzer sind, auszuschließen.

**Schmetterlings- oder Sheddach (valley):** Die Regeln dieses Dachprimitivs entsprechen dem zuvor genannten Schema eines Sattel- oder Giebeldachs, mit der Anpassung, dass anstatt einer R-Kante eine HV-Kante in den topologischen Graphen gesucht wird.

**Giebel- oder Spitzgaube (gable dormer):** Der Zielgraph für eine Giebelgaube setzt sich, ähnlich wie der eines halben Walmdaches, aus drei Knoten A, B und C zusammen. A ist mit B über eine V-Kante verbunden. Die Knoten B und C modellieren einen First und sind daher über eine R-Kante verknüpft. C schließt den ungerichteten Kreis über eine erneute V-Kante zu A (vgl. Tab. 3.2).

Um zu überprüfen, ob es sich tatsächlich um eine Giebelgaube handelt und nicht um ein angrenzendes Giebel- oder Satteldach, werden die Bounding Boxen, ein minimal umschließender Hüllkörper, der Gaube und der umschließenden Fläche verglichen. Mit einem Schwellwert (in diesem Fall 3 m) kann dieser Vergleich auch an die Datengrundlage angepasst werden. Die Länge der Schnittlinien der R-Kante darf insgesamt wie in den vorherigen Fällen ebenfalls einen Schwellwert (hier 4 m) nicht überschreiten.

**Schleppgaube (shed dormer):** Der Zielgraph einer Schleppgaube besteht, wie bei Giebeldächern, aus zwei Knoten. In diesem Fall wird in den topologischen Graphen jedoch nach einer HS-Kante gesucht.

Um zusätzlich sicherzugehen, dass es sich um eine Gaube und kein vorgelagertes Flachdach oder Ähnlichem handelt, wird mit Hilfe der Bounding Box und eines Schwellwertes (hier 1,5 m) berechnet, ob das Schleppgauben-Segment innerhalb eines anderen Segments liegt. Der Schwellwert stellt sicher, dass auch leicht vorgelagerte Gauben korrekt zugeordnet werden.

**Flach- oder Schrägdach (flat or shed roof):** Der topologische Graph eines Flach- oder Schrägdachs besitzt keine Kanten, daher wird lediglich berechnet, ob die Dachfläche horizontal (Flachdach) oder schräg zur X-Achse (Schrägdach) liegt.

## 4 3D-Visualisierung von topologischen Graphen

Ein Graph ist eine abstrakte Struktur, die zur Modellierung von in Beziehung stehenden Objekten und deren Informationen eingesetzt wird. Er hilft dabei, generelle Strukturen in Daten zu entdecken (vgl. Rodgers, 2005). Seit den sechziger Jahren widmen sich Wissenschaftler dem Gebiet Algorithmen für das Graphenzeichnen. Neben der Informatik und Mathematik finden Graphen unter anderem Anwendung in der Biologie, Chemie und Kartographie. Für das Graphenzeichnen kommen so Methoden aus der topologischen und geometrischen Graphentheorie, allgemeine Graph-Algorithmen, Datenstrukturen und Mensch-Computer-Interaktion zum Einsatz. Je nach Anwendungsfall variiert die Visualisierung von Graphen, wobei der Nutzen einer solchen Abbildung von der Lesbarkeit abhängig ist, demnach die Fähigkeit besitzen muss, die Bedeutung eines Graph und der enthaltenen Information schnell und eindeutig zu vermitteln (vgl. Di Battista u. a., 1999).

Die nachfolgenden Abschnitte erläutern die Grundlagen der Algorithmen zum Zeichnen von Graphen (vgl. Kap. 4.1) und liefern einen Überblick der Forschung in diesem Bereich (vgl. Kap. 4.2). Im Anschluss werden in Kapitel 4.3 Anforderungen formuliert, die für eine Visualisierung von topologischen Graphen nützlich sind und es findet zusätzlich in Kapitel 4.4 eine Evaluierung statt, die vergleicht, welche Programmbibliotheken für eine 3D-Visualisierung in Frage kommen. Abschließend wird in Kapitel 4.5 kurz der für diese Arbeit implementierte Prototyp eines 3D-Web-Viewers vorgestellt.

### 4.1 Algorithmen zum Zeichnen von Graphen

Für viele Anwendungen haben Algorithmen für das Graphenzeichnen eine hohe Relevanz, da sie die in Graphen enthaltenen Informationen für den Menschen lesbar und verständlich darstellen. Die unterschiedlichen Methoden lassen sich grob in die nachfolgend genannten Ansätze einteilen.

**Hierarchische Methoden** organisieren gerichtete Graphen und versuchen diese zu ordnen. Ein Nachteil ist jedoch, dass diese Methoden entweder nur mit Graphen ohne Zyklen arbeiten, oder mit Zyklen, deren enthaltene Knoten in einer bestimmten Art und Weise geordnet werden (vgl. Rodgers, 2005, S. 147). Bei der Erstellung der topologischen Dachgraphen sind Zyklen jedoch häufig anzutreffen und die entsprechenden

Knoten lassen sich nicht in eine definierte Reihenfolge bringen. Da die Kanten zusätzlich keine Richtung aufweisen, der Graph demnach ungerichtet ist, wird dieser Ansatz im weiteren Verlauf nicht weiter verfolgt.

**Planare Layouts** stellen eine Methode zur Zeichnung von planaren Graphen dar. Hierfür existieren viele und schnelle Methoden, die zum Beispiel auf eine Delaunay-Triangulation aufsetzen. Da jedoch nicht jeder Graph planar ist, werden bei einigen Verfahren zusätzliche Knoten oder Kanten eingefügt, um eine Überkreuzung von Kanten zu vermeiden. Nicht immer wird hierbei ein zufriedenstellendes Layout produziert, daher werden Planare Layouts häufig mit anderen Methoden, beispielsweise kräftebasierten Verfahren, kombiniert (vgl. Rodgers, 2005, S. 148).

Das **kräftebasierte Zeichnen** (engl. Force-Directed Layouts) simuliert ein System von Kräften auf einem Eingabegraph und berechnet lokal eine minimale Energiegruppierung (vgl. Di Battista u. a., 1999, S. 29). Diese Algorithmen berechnen das Layout eines Graphs allein aufgrund der im Graphen enthaltenen Information, die durch die Struktur modelliert wird. Die Energie oder auch Kraft wird durch den Einfluss der eingehenden Kanten auf einen Knoten berechnet. Kräftebasiertes Zeichnen von Graphen liefert (für nicht fixierte Knoten) ästhetische Abbildungen mit gleichmäßig verteilten Knoten und geraden Kanten. Als Kräfteberechnung werden häufig zusätzliche mathematische oder physikalische Modelle angewendet, sodass sich beispielsweise bestimmte Knoten voneinander abstoßen oder sich gegenseitig anziehen. Der Einsatz von kräftebasierten Ansätzen ist in der Regel auf kleine, verbundene und ungerichtete Graphen beschränkt (vgl. Kobourov, 2013).

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Lesbarkeit von Graphen von vielen Aspekten abhängt. Laut Wolff (2013) können Algorithmen für das Graphenzeichnen nicht generell für geometrische Netzwerke verwendet werden, da sie die zugrundeliegende Geometrie der Knoten und Kanten zumeist nicht berücksichtigen. So müssen beispielsweise planare Graphen auf eine Ebene gezeichnet werden und können daher nicht ohne Weiteres in die Dreidimensionalität übertragen werden. Kräftebasierte Methoden benötigen geringere Anpassungen für die zusätzliche Dimension, jedoch werden die Positionen der Knoten stark verzerrt und sind häufig nicht auf eine eindeutige Lage definierbar. Rodgers (2005) betont, dass eine 3D Ansicht nur zusätzlichen Nutzen erbringt, wenn eine interaktive Navigation über Rotieren, Schwenken und Zoomen möglich ist. Diese Umstände werden im formulierten Anforderungskatalog (vgl. Kap. 4.3) berücksichtigt.

## 4.2 Graphzeichnen mit geographischen Beschränkungen

Wie Landesberger u. a. (2011, S. 1725) beschreiben, sind Graphen mit einer geographischen Referenz, bei der Knoten oder Kanten eine festgelegte Position besitzen, ein spezielles Forschungsfeld. Eine feste Knotenposition verhindert den Einsatz üblicher

Algorithmen und führt beispielsweise zu Kantenkreuzungen oder zu überlangen Kanten.

Brandes u. a. (2000) zeigen, wie gerade Kanten durch kubische Bézierkurven ausgetauscht werden. Diese sind durch eine Sequenz von vier Kontrollpunkten definiert, wobei Start- und Endpunkt den Punkten der jeweiligen Kante im Graph entsprechen. Kantenkreuzungen und Überlagerungen werden so häufig vermieden, jedoch nicht gänzlich beseitigt. Zudem ordnet der gezeigte Ansatz alle eingehenden Kanten pro Knoten, lässt jedoch den Startknoten einer Kante außer Acht. Bei einer größeren Anzahl von konvergierenden Kanten entstehen so ungewollte Rotationen und verzerrte Bézierkurven.

Abellanas u. a. (2005) stellen eine kräftebasierte Methode (vgl. Kap. 4.1) mit geographischen Beschränkungen und erweiterten ästhetischen Ansätzen vor. Knoten repräsentieren Regionen (z.B. Bundesländer) und sollen daher in der Nähe des Zentrums und nicht im Umfeld der Grenzen platziert werden. Im Graph werden so die zugehörigen Regionen und deren Beziehungen untereinander veranschaulicht. Die Länge einer Kante wird zunächst durch eine Gewichtung über den Durchschnitt der Entfernung zweier Zentren und ihrer minimalen Distanz zueinander berechnet. Zusätzlich wird eine Funktion für eine zentripetale Anziehungskraft eingeführt, damit sich Knoten nicht zu weit von ihrem Zentrum entfernen. Zwei benachbarte Knoten nähern sich so begrenzt durch ihre Region an, bleiben jedoch weiterhin in der Nähe des Zentrums.



Abbildung 4.1: Graphzeichnen mit geographischen Beschränkungen: (links) Initiales Layout, (mittig)  $SE-R^2$ , (rechts)  $DH-R^2$  (Abellanas u. a., 2005).

Abbildung 4.1 zeigt die Umsetzung aufgrund von zwei unterschiedlichen kräfteba-

sierten Ansätzen. Auf der linken Seite ist der zugrunde liegende Graph abgebildet. Viele Knoten liegen hier nahe einer Grenze und es bestehen einige Überschneidungen der Kanten. Die zwei folgenden Graphen zeigen die zwei Ergebnisse der kräftebasierten Ansätze, die sich jeweils in der Gewichtung von unterschiedlichen Parametern unterscheiden. Es wird deutlich, dass je nach Region und Konvergenz die Darstellung verbessert wird. Speziell die Vermeidung und Bestrafung von Kantenkreuzungen führt insgesamt zu ästhetischeren Abbildungen, auch wenn Überschneidungen nicht immer vermieden werden.

Ein weiteres interessantes Forschungsfeld in diesem Bereich nehmen Algorithmen zum Zeichnen von Liniennetzen von Zugverbindungen, U-Bahnen oder Straßenbahnen ein. So stellen Nollenburg und Wolff (2011) ein automatisiertes Verfahren zum Zeichnen und Beschriften von Graphen, im speziellen Liniennetzen, vor. Hierfür werden sogenannte harte und weiche Beschränkungen (engl. hard/soft constraints) eingeführt. Harte Beschränkungen müssen unter allen Umständen eingehalten werden, wobei weiche Beschränkungen global optimiert werden sollen.

Diese Regeln erhalten die relativen Positionen und die Topologie, minimieren die Kantenlänge und verhindern Überlagerungen. Insgesamt sind die Anpassungen am zugrunde liegenden Graph jedoch zu intensiv, um die vorgestellte Methode in dieser Arbeit einzusetzen.

Einen anderen Ansatz zur Visualisierung von geographischen Netzwerken verfolgen Lambert u. a. (2010). Hier werden Flughafenverbindungen auf einem 3D-Globus dargestellt und zur besseren Übersicht benachbarte Kanten gebündelt. Jedoch eignet sich dieser Ansatz nur für Netzwerke mit einer hohen Anzahl von Kanten. Da die in dieser Arbeit eingesetzten topologischen Graphen zumeist mit wenigen Kanten modelliert werden, ist hier der Verlauf der Kanten von größerem Interesse.

Um zu verhindern, dass in der 3D-Visualisierung die Linien durch den Globus gezeichnet werden und diesen kreuzen, existiert eine Methode die zusätzliche Knoten erzeugt. Diese Pseudoknoten werden auf zwei Sphären mit einem kleineren und einem größeren Radius des eigentlichen Globus erzeugt. Über ein 3D-Voronoi-Diagramm wird sichergestellt, dass mindestens eine Route für jede Kante existiert, die nicht den Globus kreuzt. Die so erzeugten Kanten verlaufen in der Regel zackenförmig und werden daher mithilfe von Bézierkurven oder Splines geglättet.

Abbildung 4.2 zeigt, wie die vorgestellte Methode einen Graph mit internationalen Flughafenverbindungen modelliert. Links ist zu erkennen, wie die jeweiligen Verbindungen den 3D-Globus schneiden und die Kanten sich jeweils überlagern. Der Globus in der Mitte gibt den Stand nach der Einführung der Sphären und der Kantenglättung wider. Im abschließenden Schritt werden die Kanten gebündelt und der Globus mit bestimmten Hintergrundinformationen unterlegt.

Die vorgestellten Studien zeigen, dass die Visualisierung von Graphen unter geogra-





Abbildung 4.2: 3D-Graphzeichnen und Kantenbündelung in Netzwerken (Lambert u. a., 2010, angepasst).

phischen Beschränkungen mit bestimmten Problemen konfrontiert wird. Topologische Dachgraphen zeigen weitere sehr spezielle Aspekte für die Visualisierung auf. So repräsentieren Knoten häufig kleine Dachflächen und werden von Kanten oder anderen Knoten überlagert. Da durch das Laserscanning und die Segmentierung unvermeidliche Fehler entstehen (vgl. Kap. 3), müssen Lücken in den Dachflächen berücksichtigt werden. Hierdurch wird beispielsweise der Ansatz von Abellanas u. a. (2005) erschwert, da sich die Zentrumsberechnung nicht einfach auf Regionen mit Löchern übertragen lässt. Da die zugrundeliegenden Informationen der Punktdaten und Schnittkanten von großer Bedeutung sind, greifen die meisten 2D-Ansätze in diesem Fall nicht. Erst die 3D-Visualisierung ermöglicht die einwandfreie Interpretation, zum Beispiel von schrägen oder kleinen Dachflächen. Eine Kombination unterschiedlicher 2D- und 3D-Ansätze scheint erfolgversprechend.

### 4.3 Anforderungskatalog für eine Visualisierungsumgebung

Um eine geeignete Entwicklungsumgebung zu schaffen, wird ein Anforderungskatalog erstellt, der bestimmte Aspekte für diese Arbeit abdeckt. Die in Kapitel 3.3 vorgestellte Erstellung von topologischen Graphen erzeugt aus der Punktwolke dreidimensionale Schnittkanten die als Linien dargestellt werden. Daher soll die Anwendung 3D-Grafiken darstellen und eine interaktive Navigation mit unterschiedlichen Perspektiven ermöglichen. Selbst kurze Linienzüge sollen hierdurch wahrnehmbar sein. Die erzeugten Graphen sollen zusätzlich zur Punktwolke darstellbar sein und über ein Layerverzeichnis zu- und abschaltbar sein.

Da die berechneten Kanten im Zusammenhang mit den eigentlichen Schnittkanten der Dachflächen in Beziehung stehen, wird dies auch durch die Visualisierung verdeutlicht. Hierzu bietet sich beispielsweise an, den Schnittkantenmittelpunkt als Stützpunkt für die entsprechende Kante einzusetzen. Überlagerungen der Kanten werden so teilweise vermieden.

Zusätzlich sollten die Graphen möglichst planar im dreidimensionalen Raum dargestellt werden, mit der Einschränkung, dass die Knoten, die die Dachflächen repräsentieren, nur innerhalb der Bounding Box variabel positionierbar sind. Die Kanten werden im topologischen Graph durch vordefinierte Typen klassifiziert und sollten daher auch in der Visualisierung anhand einer Farbzuzuweisung unterschieden werden. Eine interaktive Selektion von Knoten und Kanten kann bei der Identifikation von Problemdächern und Gebäuden hilfreich sein.

Bei der Auswahl einer geeigneten Bibliothek wird die plattformübergreifende Programmierung als weiterer Aspekt in Betracht gezogen. Durch Standards wie HTML5<sup>1</sup> und WebGL<sup>2</sup> ist es heutzutage möglich, eine dreidimensionale Visualisierung vollständig über einen Webbrowser zu realisieren, ohne zusätzliche Software zu installieren. Daher fällt der Schwerpunkt der Visualisierung und Programmbibliotheken auf die Skriptsprache JavaScript, mit der eine schnelle Prototyp-Entwicklung ermöglicht wird.

### 4.4 Vergleich von Programmbibliotheken

In diesem Abschnitt werden unterschiedliche Bibliotheken beziehungsweise Programme verglichen, die einerseits speziell für die Visualisierung von Graphen entwickelt werden (z.B. GraphViz und Gephi) und andererseits hauptsächlich für die Visualisierung von Daten (D3.js) oder 3D-Szenen (Three.js) implementiert sind. Die nachfolgenden Paragraphen geben einen kurzen Einblick in die untersuchten Bibliotheken.

**Graphviz**<sup>3</sup> ist eine Open-Source-Visualisierungssoftware für abstrakte Graphen und Netzwerke. Im weiteren Verlauf wird die Portierung von Graphviz für JavaScript Viz.js<sup>4</sup> näher betrachtet. Hauptaugenmerk dieser Bibliothek sind graphenbasierte Diagramme, die durch sogenannte DOT-Dateien modelliert werden.

**Gephi**<sup>5</sup> ist ebenfalls eine quelloffene Visualisierungssoftware für Graphen, jedoch mit eigener grafischen Oberfläche. Über eine API können zusätzliche Plugins entwickelt und eingebunden werden. Gephi bietet eine große Anzahl an Visualisierungsalgorithmen und eine interaktive Navigation der vorhandenen Daten. Wie Graphviz setzt jedoch auch Gephi lediglich auf 2D-Graphen. Zusätzliche Daten, wie beispielsweise die Punktwolke, können nur mit großem Aufwand oder gar nicht eingefügt werden.

Das **JavaScript InfoVis Toolkit (JIT)**<sup>6</sup> liefert Werkzeuge zur interaktiven Darstellung von Daten im Web. Hauptaspekte sind auch hier 2D-Diagramme, daher sind implementierte Graph-Algorithmen nicht umfangreich vertreten.

---

<sup>1</sup>W3C - HTML 5:<http://dev.w3.org/html5/spec/> (abgerufen am 17.02.2014).

<sup>2</sup>Khronos Group - WebGL: <http://www.khronos.org/webgl/> (abgerufen am 17.02.2014).

<sup>3</sup>Graphviz: <http://www.graphviz.org> (abgerufen am 17.02.2014).

<sup>4</sup>Viz.js: <https://github.com/mdaines/viz.js/> (abgerufen am 17.02.2014).

<sup>5</sup>Gephi: <https://gephi.org> (abgerufen am 17.02.2014).

<sup>6</sup>JavaScript InfoVis Toolkit (JIT): <http://philobg.github.io/jit/> (abgerufen am 17.02.2014).

**Sigma.js**<sup>7</sup> ist eine Visualisierungsbibliothek, die sich speziell mit Graphen befasst. Jedoch sind die Layoutalgorithmen in ihrer Funktion noch eingeschränkt und Graphen sind lediglich in 2D darstellbar. Eine Erweiterung der Grundfunktionalitäten ist jedoch über Plugins möglich und es findet eine aktive Weiterentwicklung statt.

**D3.js**<sup>8</sup> (Data-Driven Documents) ist eine Bibliothek zur Visualisierung und interpretation von Daten im Allgemeinen. Ein Vorteil von D3 gegenüber anderen Bibliotheken ist die Unterstützung von geographischen Koordinaten und verschiedenen Projektionen. Eine direkte 3D Darstellung fehlt, jedoch gibt es viele Ansätze und Kombinationen mit anderen Bibliotheken in diesem Bereich.

**Three.js**<sup>9</sup> ist eine Bibliothek für die Darstellung von 3D Szenen im Webbrowser. So kann beispielsweise die Punktwolke der LIDAR Daten effizient im Browser betrachtet werden. Über Eingaben des Nutzers kann die Perspektive und die Zoomstufe angepasst werden. Da Three.js keine Funktionalität für die Visualisierung von Graphen liefert, gibt es unterschiedliche Weiterentwicklungen. Im weiteren Verlauf wird unter anderem Graphit<sup>10</sup> betrachtet.

Ein Vergleich der untersuchten Bibliotheken in Tabelle 4.1 zeigt, dass mehr als die Hälfte der Bibliotheken die Anforderung einer dreidimensionalen Darstellung nicht erfüllen. Die Entwicklung dieser Bibliotheken konzentriert sich auf die Implementierung von Layoutalgorithmen und die Verarbeitung von Graphen (z.B. Graphviz und Gephi). Erweiterungen und Portierungen dieser Grundprogramme ermöglichen die Realisierung im Webbrowser (Viz.js, JIT und Sigma.js), jedoch werden die Graphen häufig als feste Objekte dargestellt. Eine interaktive Nutzung und Bedienung beschränkt sich meist auf Zoom und Auswahl einzelner Objekte.

### 4.5 Umsetzung und Ausblick

Dem Vergleich aus Tabelle 4.1 folgend, wird ein Prototyp zur dreidimensionalen Darstellung von Punktwolken und Graphen mittels Three.js entwickelt. Erste Ergebnisse der Implementierung sind in Abbildung 4.3 zu sehen. Bisher ist es möglich, frei in den Daten zu navigieren und die Perspektive je nach Wunsch zu ändern. Über eine Ebenenleiste können einzelne Datensätze an- beziehungsweise abgewählt werden, neue Daten werden über Drag and Drop hinzugeladen.

Three.js ist eine Bibliothek zur reinen Visualisierung von dreidimensionalen Szenen, daher existieren keine Schnittstellen zur Zeichnung von Graphen. Abbildung 4.3(b) zeigt die aktuelle Umsetzung der Kantenzeichnung über quadratische 3D-Beziérkurven. Als Stützpunkt dient der Mittelpunkt der entsprechenden Schnittkante. Längere Schnittli-

---

<sup>7</sup>Sigma JS: <http://sigmajs.org> (abgerufen am 18.02.2014).

<sup>8</sup>D3 - Data-Driven Documents: <http://d3js.org/> (abgerufen am 18.02.2014).

<sup>9</sup>Three.js: <http://threejs.org/> (abgerufen am 18.02.2014).

<sup>10</sup>Graphit: <https://github.com/davidpiegza/graphit> (abgerufen am 18.02.2014).

Tabelle 4.1: Vergleich verschiedener Programmierbibliotheken zur Visualisierung von topologischen Graphen.

<b>Bi- blio- thek</b>	<b>2D</b>	<b>3D</b>	<b>Navigation/Interaktion</b>	<b>Knoten- position</b>	<b>Datenformate</b>	<b>Graph- Visualisierung</b>	<b>Web-Visualisierung</b>
Graph- Viz	ja	nein	nein	fest	.dot	Viele Visualisierungs- Algorithmen	nein
Viz	ja	nein	nein	fest	.dot	Viele Visualisierungs- Algorithmen	ja
Gephie	ja	nein	Pan, Zoom, Auswahl einzelner Knoten/Kanten	variabel, interaktiv	CSV, GraphML, GEXF u.a.	Viele Visualisierungs- Algorithmen	nein
JIT	ja	ja	Pan, Zoom, Auswahl einzelner Knoten/Kanten	variabel, interaktiv	JSON	Force-Directed, Radial	ja
Sigma	ja	nein	Pan, Zoom, Auswahl einzelner Knoten/Kanten	variabel, interaktiv	GEXF, JSON	Force-Directed	ja
D3	ja	nein	Pan, Zoom, Auswahl einzelner Elemente	variabel, interaktiv	JSON, XML, CSV u.a.	Force-Directed	ja
Three	ja	ja	Pan, Zoom, Perspektiv	variabel	-	-	ja
Gra- phit	ja	ja	Pan, Zoom, Perspektiv	variabel	-	Force-Directed	ja

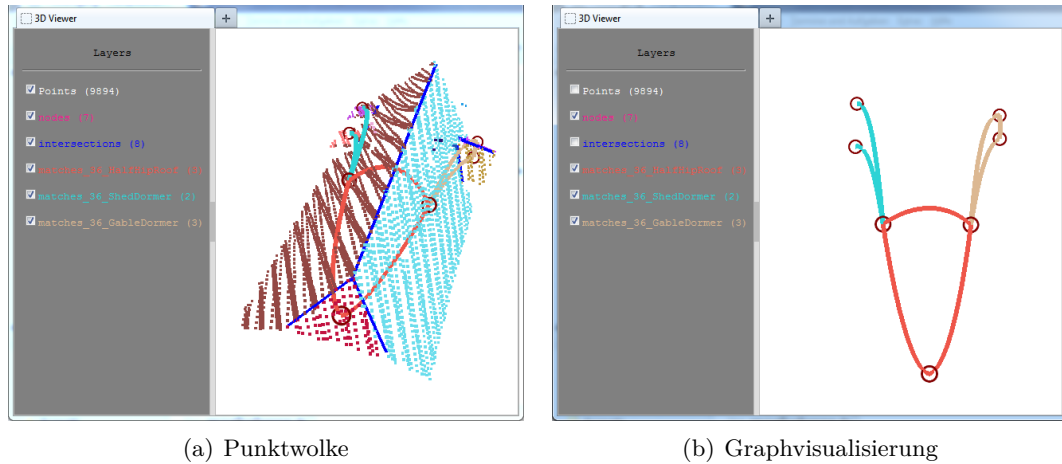


Abbildung 4.3: Prototyp des 3D-Web-Viewers.

nien sind so vergleichsweise schnell den zugehörigen Kanten zuzuordnen. Bei kürzeren Schnitten, beispielsweise einer Gaube, wird der Zusammenhang nur angedeutet und nicht auf den ersten Blick deutlich (vgl. hierzu auch Abb. 4.3(a)). Beziérkurven sind daher nicht unbedingt die beste Wahl und in einer Weiterentwicklung sollten Alternativen in Betracht gezogen werden. Überschneidungen werden jedoch nahezu vollständig vermieden und sind bei den in dieser Arbeit beobachteten topologischen Graphen allgemein unüblich. Problematisch ist hierbei lediglich die gleichzeitige Darstellung von Punktwolke und Graphen, da die Punktdaten die Kanten häufig überlagern.

Die Repräsentation der Dachflächen erfolgt über die Knoten, die über eine Mittelpunktberechnung eine feste Position zugewiesen bekommen. Überlagerungen oder vollständige Verdeckungen werden so häufig vermieden. Dass dieses Verfahren jedoch nicht unproblematisch ist, zeigt Abbildung 4.4. Dargestellt ist eine Hälfte eines Satteldaches (blau) mit enthaltener Schleppgaube (grün). Durch nahezu gleiche Schwerpunkte schneiden sich die Knotenobjekte und es ist nicht möglich, die zugehörigen Dachflächen eindeutig zu identifizieren.

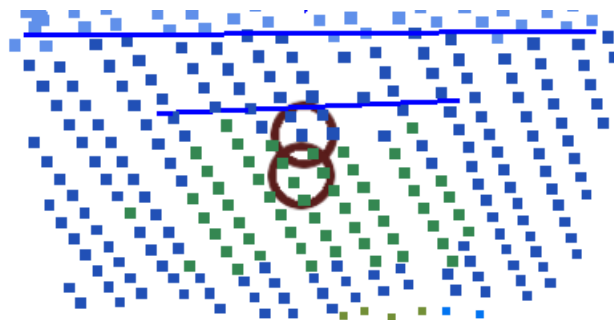


Abbildung 4.4: Problematische Knotenvisualisierung.

Allgemein läuft die gesamte 3D Visualisierung im Webbrowser sehr flüssig und die Navigation über Maus oder Tastatur ist intuitiv. Weiterentwicklungen in diesem Bereich sollten auf ein verbessertes Graphzeichnen abzielen und die Handhabung von unterschiedlichen Datentypen einbeziehen.

In den vorangegangenen Abschnitten wird gezeigt, dass Menschen ohne geeignete Visualisierung die Fähigkeit fehlt, komplexere Graphen zu erfassen und zu deuten. Flexible Darstellungen ermöglichen unterschiedliche Informationstiefen und helfen unbekannte Beziehungen der Daten zu entdecken. Viele Studien befassen sich mit der 3D-Visualisierung von komplexen Netzwerken, jedoch gibt es, wie diese Arbeit zeigt, einen Bedarf an Darstellungen von kleinen Graphen in Kombination mit den zugrundeliegenden Daten (3D Punktwolke, Schnittkanten, etc.). Der Mehrwert an Informationen durch den vorgestellten 3D-Viewer hilft, Zusammenhänge der Dachtopologie besser zu verstehen und Abläufe in der Automatisierung zu optimieren.

# 5 Ergebnisse und Diskussion

Dieses Kapitel widmet sich den Ergebnissen des implementierten Teilgraph-Matching-Algorithmus. Mit dem Vaihinger Testdatensatz befasst sich Kapitel 5.1 und beschreibt das Untersuchungsgebiet, wichtige Merkmale und weitere Informationen der eingesetzten Daten. Die ersten Ergebnisse in Kapitel 5.2 machen deutlich, in welcher Hinsicht erkannte Zielgraphen abhängig von den in Kapitel 3 beschriebenen Parametern sind. Hauptaugenmerk liegt hierbei auf den Schnittkanten und deren Einfluss auf die topologischen Graph-Modelle. Kapitel 5.3 befasst sich mit der Evaluation des Teilgraph-Matchings. Es werden unterschiedliche Qualitätsmerkmale vorgestellt und gezeigt, wie diese berechnet werden. Zusätzlich werden Probleme beziehungsweise Fehler und ihre Ursachen erläutert. In Kapitel 5.4 werden die Ergebnisse verschiedener Regelsätze aus der Literatur gegenübergestellt. Es wird gezeigt, wie stark das Ergebnis des Teilgraph-Matchings von der zugrunde liegenden Bibliothek für Zielgraphen abhängig ist.

## 5.1 Untersuchungsgebiet und Datengrundlage

Datengrundlage des in dieser Arbeit vorgestellten Verfahrens ist der für die Forschung frei verfügbare Vaihingen Testdatensatz (vgl. Rottensteiner u. a., 2012). Um die Prozessierung und die Fehlersuche zu beschleunigen, wurde ein Subset von circa achtzig Gebäuden gewählt (vgl. Abbildung 5.1 mit der Gesamtübersichtsabbildung im Anhang A1). Die folgenden zwei Abschnitte beschreiben kurz das Untersuchungsgebiet des ausgewählten Ausschnitts und die Eigenschaften der Daten.

### Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet befindet sich circa 20 km nord-westlich von Stuttgart und umfasst insgesamt einen Bereich von 30.000 m<sup>2</sup> mit etwa 85 Gebäuden. Wie aus Abbildung 5.1 deutlich wird, handelt es sich um einen innerstädtischen Bereich mit der hauptsächlichen Nutzung als Wohnbezirk. Zusätzlich zeichnet sich dieser Bereich durch einen geringen Anteil an Vegetation aus und eignet sich daher besonders für die Gebäuderekonstruktion. Den größten Anteil der Dachformen nehmen hierbei Giebel- und Walmdächer ein. Hervorzuheben als Besonderheit für die Segmentierung und Rekonstruktion ist ein Turm (auch Haspelturm genannt<sup>1</sup>) im Westen, ein zentral gelegener

---

<sup>1</sup><http://www.vaihingen.de/d/2546> (aufgerufen am 23.01.2014).



Abbildung 5.1: Untersuchungsgebiet Vaihingen, DE (Ausschnitt digitales Luftbild).

Parkplatz und die enge Bebauung der Gebäude.

### Datengrundlage

Abbildung 5.2 zeigt den in dieser Arbeit prozessierten Punktwolken Datensatz in einer perspektivischen Ansicht. Dieser Ausschnitt ist Teil eines Projekts der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung (DGPF) zur Beurteilung von Luftbildkameras (vgl. Cramer, 2010).

Die LIDAR-Daten wurden durch ein Leica ALS50 System mit einem  $45^\circ$  Sichtfeld (FOV) und einer durchschnittlichen Flughöhe von 500 m über Grund erstellt. Die Streifenüberlappung beträgt im Mittel etwa 30 % und der Median der Punktdichte liegt bei  $6,7 \text{ Punkte/m}^2$ . Haala u. a. (2010) merken jedoch an, dass die Punktdichte auf dem gesamten Datensatz stark variieren kann, vor allem in Bereichen ohne Überlappung. Demnach wird eine Punktdichte zwischen 4 und  $7 \text{ Punkte/m}^2$  erwartet (vgl. Rottensteiner u. a., 2012). Die für Abbildung 5.1 und den Referenzdatensatz verwendeten digitalen Luftbilder sind hochauflösende 16 bit pan-sharpened Infrarotbilder mit einer Bodenauflösung (GSD) von 8 cm.

## 5.2 Evaluation der Schnittkantenberechnung

Da die Segmentierung und die daraus abgeleitete Schnittkantenberechnung einen großen Einfluss auf die folgende Graph-Modellierung haben (vgl. Kap. 5.3), wird eine Evalu-



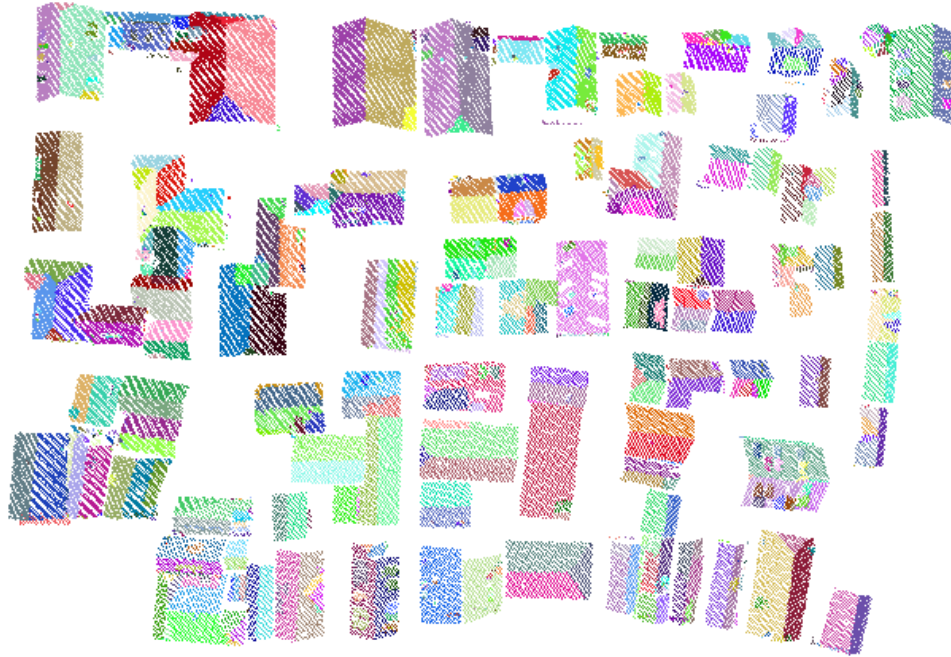


Abbildung 5.2: Datensatz der Vaihingen Punktwolke, DE (Ausschnitt, bereits segmentiert).

ierung der Klassifikation der Kanten anhand von Referenzkanten durchgeführt. Abbildung 5.3 zeigt in einer Übersicht die manuell erfassten Kanten für das Untersuchungsgebiet. Es wurden insgesamt 477 Kanten mit den Typen R, HS, H, V, HR und HV (vgl. Kap. 3.3) digitalisiert.

Tabelle 5.1 zeigt die Anzahl der Referenzkanten aufgeteilt nach Schnittkantentyp. Hier wird deutlich, dass das Hauptaugenmerk beim Teilgraph-Matching auf den vier Typen R (First), HS (zwei geneigte Dachflächen mit gleicher Richtung), H (Grat) und V (Kehle) liegt. Die Kantentypen HR (z.B. bei einem Mansarddach) und HV (z.B. bei einem Schmetterlingsdach) treten in diesem Testdatensatz kaum auf.

Tabelle 5.1: Verteilung der Referenzkanten nach Typ.

	<b>R</b>	<b>HS</b>	<b>H</b>	<b>V</b>	<b>HR</b>	<b>HV</b>	<b>Gesamt</b>
# Referenzkanten	154	123	108	86	5	1	477

Die nachfolgenden Abschnitte erläutern, wie mithilfe der Referenzkanten geeignete Parameter für die Berechnung der Schnittkantentypen bestimmt werden. In einem automatisierten Verfahren werden die berechneten Schnittkanten mit den Referenzkanten verglichen. Liegen die Kanten in einem bestimmten Puffer um die entsprechende Referenzkante und stimmen die Typen überein, ergibt sich ein Treffer (*True Positive*). Kann eine berechnete Kante nicht zugewiesen werden, ergibt sich ein falscher Treffer



Abbildung 5.3: Erstellte Referenzkanten mit Kantentyp und Vorkommen.

(*False Positive*). Referenzkanten, denen keine entsprechende Schnittkante zugewiesen wird, fallen unter die Bezeichnung *False Negative*. Aus diesen Werten lässt sich ein statistisches Gütekriterium der Klassifikation bestimmen (vgl. Rutzinger u. a., 2009).

Wie in Kapitel 2.1 erläutert, entstehen durch das Laserscanning und die anschließende Segmentierung unausweichliche Fehler oder Lücken. Daher wird im Folgenden ein Puffer von einem Meter um die Referenzkanten als akzeptabler Fehler angenommen. Um jedoch die Auswirkungen eines schmaleren Puffers zu testen, werden die Endergebnisse mit den optimal bestimmten Parametern zusätzlich mit einem 0,5 m Puffer überprüft (vgl. hierzu Abb. 5.6 und Abb. 5.7).

Die folgenden Abbildungen 5.4, 5.5 und 5.6 stellen die Ergebnisse der drei unterschiedlichen Operationen zur Schnittkantenberechnung (vgl. Kap. 3.2) dar. Für die Parameter *Within Perpendicular Distance* und *Maximum Consecutive Point Distance* werden die Standardwerte von jeweils 1 m festgelegt. Richtig erkannte Schnittkanten (*True Positive*) werden grün dargestellt, wohingegen berechnete, jedoch nicht mit den Referenzkanten übereinstimmende Kanten (*False Positive*), rot visualisiert werden. Referenzkanten, die nicht durch eine berechnete Schnittkante erklärt werden (*False Negative*), sind orange und als entsprechender Puffer abgebildet (vgl. Rutzinger u. a., 2009).

Die Berechnung mittels *Maximaler Ausdehnung* wird in Abbildung 5.4 dargestellt. Rein visuell zeigt sich hier bereits, dass falsch positive Treffer (rote Kanten, 291) deutlich häufiger auftreten als echte Treffer (grüne Kanten, 139). Zusätzlich fällt auf, dass eine hohe Anzahl der falsch positiven Kanten eine Länge von über 10 m aufweist. Negativ ist ebenfalls die hohe Anzahl der falsch negativen Kanten (338), die durch die

Überlagerung der roten Kanten zunächst nicht sehr deutlich wird. Dies sind jedoch mehr als 70 % aller Referenzkanten, die nicht zugewiesen werden konnten.

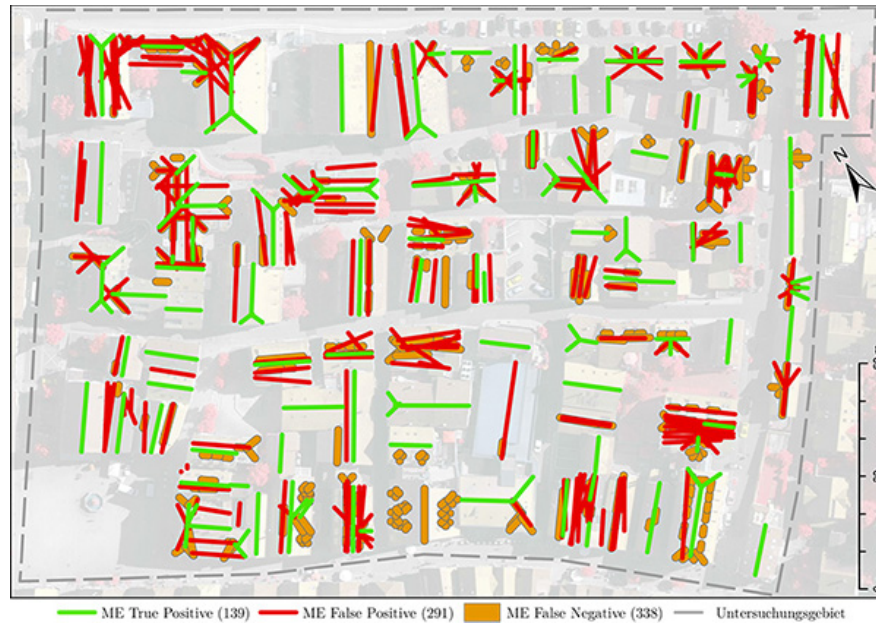


Abbildung 5.4: Schnittkantenbestimmung mit maximaler Ausdehnung (1 m Puffer).

Ein etwas besseres Ergebnis ergibt sich durch den *booleschen Vereinigungsparameter* in Abbildung 5.5. Der geringere Anteil an roten Kanten täuscht jedoch über vergleichbar schlechte Werte bei der *maximalen Ausdehnungsoperation* hinweg (vgl. Tab. 5.2). Auch hier werden mehr als 50 % der Schnittkanten nicht durch Referenzkanten bestätigt (216) und circa 70 % der Referenzkanten entsprechen keiner Schnittkante (331).

Bei genauerer Betrachtung fällt auf, dass viele Kanten nicht als Treffer gezählt werden, da sie deutlich über den Puffer hinausragen, demnach zu lang sind. Auch kürzere aggregierte Referenzkanten werden nicht zugewiesen, da die entsprechende Schnittkante als eine durchgängige Linie bestimmt wurde. Für sich alleinstehende kurze Referenzkanten werden zudem nicht zugewiesen, da kleinere Dachflächen (z.B. Schleppgauben) durch das Laserscanning und die Segmentierung nicht als eigenständige Flächen erkannt werden. Mehr als 50 % der nicht zugewiesenen Referenzkanten sind kleiner als 2 m und weniger als ein Drittel dieser Kanten sind länger als 4 m.

Die Ergebnisse der Berechnung mit dem letzten Parameter, der *booleschen Schnittmenge*, sind in Abbildung 5.6 dargestellt. Im Gegensatz zu den vorherigen Ergebnissen (vgl. Abb. 5.4 und 5.5) überwiegen die korrekt positiven Treffer (251) gegenüber den falsch positiven Kanten (104). Demnach werden mehr als 70 % der berechneten Kanten einer entsprechenden Referenzkante korrekt zugeordnet.

Auch die Anzahl der falsch negativen Kanten (226) ist im Vergleich zu den vorherigen Operationen deutlich gesunken. Dies hängt unter anderem damit zusammen, dass

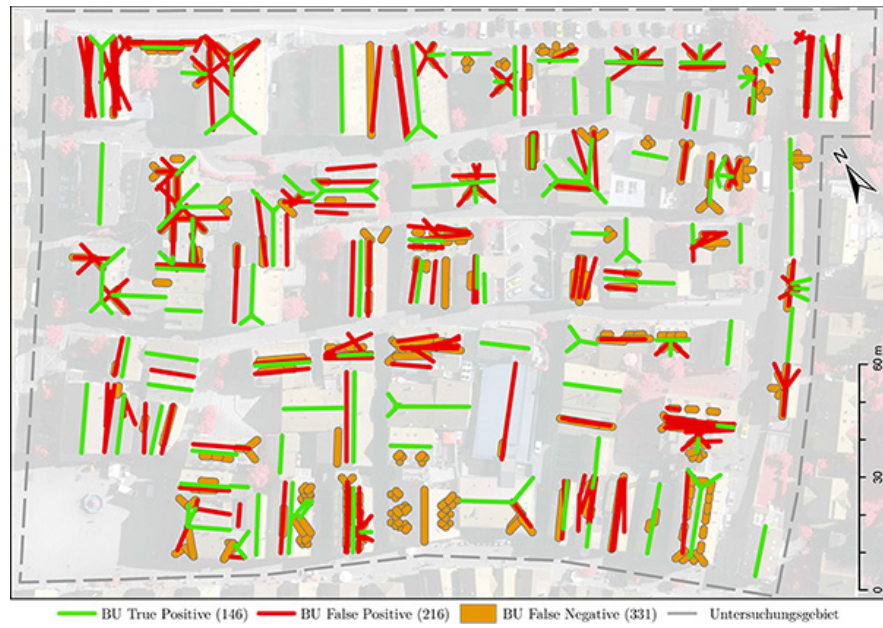


Abbildung 5.5: Schnittkantenbestimmung mit boolescher Vereinigung (1 m Puffer).



Abbildung 5.6: Schnittkantenbestimmung mit boolescher Schnittmenge (1 m Puffer).

auch die Anzahl der berechneten Schnittkanten zusammengenommen geringer ist (vgl. Tab. 5.2).

Ein Vergleich der Linienlängen der nicht gefundenen Referenzkanten zeigt, dass insgesamt Kanten über 3 m von allen Methoden relativ gut erkannt werden. Die durchschnittliche Länge der nicht erkannten Referenzen beträgt bei *maximaler Ausdehnung* 3,1 m, bei *boolescher Vereinigung* 3,0 m und bei *boolescher Schnittmenge* 2,6 m. Die maximale Länge beträgt bei *maximaler Ausdehnung* und *boolescher Vereinigung* jeweils 23,9 m, bei *boolescher Schnittmenge* lediglich 13,8 m.

Aus diesen Ergebnissen wird deutlich, dass die Verschneidungsoperation der berechneten Schnittkanten mittels *boolescher Schnittmenge* die realen Kanten, unabhängig ihrer Länge, deutlich besser modelliert und daher auch zu besseren Ergebnissen in der folgenden Typbestimmung führt.

Um die bisherige These zu stützen, dass die *boolesche Schnittmenge* für diesen Testdatensatz bessere Ergebnisse erzielt, wird die mögliche Fehlertoleranz von bisher 1 m auf 0,5 m halbiert. Abbildung 5.7 zeigt die hierbei entstandenen Ergebnisse. Zwar verringert sich die Anzahl der korrekt berechneten Schnittkanten (vgl. Tab. 5.2), jedoch betrifft dies zu mehr als 50 % Kanten mit einer Länge von weniger als 2,5 m. Diese Schnittkanten können zusätzlich als sekundär betrachtet werden, da sie zu einem hohen Anteil (ca. 70 %) Dachgauben beschreiben und demnach in einer späteren Rekonstruktion lediglich die Detailtiefe erhöhen, jedoch die Grundform eines Gebäudedachs nicht beeinflussen.



Abbildung 5.7: Schnittkantenbestimmung mit boolescher Schnittmenge (0,5 m Puffer).

Tabelle 5.2 fasst die zuvor genannten Ergebnisse zusammen und stellt eine Übersicht der unterschiedlichen Operationen für die Schnittkantenberechnung dar. Die Prozentan-

gaben beziehen sich auf die Gesamtanzahl der Referenzkanten und nicht auf die Anzahl der jeweils pro Methode berechneten Kanten, um eine Vergleichbarkeit herzustellen.

Hier wird deutlich, dass die Anzahl der berechneten Schnittkanten insgesamt (*Kanten*) keinen positiven Einfluss auf die Anzahl der korrekt eingestuftem Treffer (*True Positive*) hat. Selbst bei einer geringeren Fehlertoleranz im Vergleich zu den Operationen *maximaler Ausdehnung* und *boolescher Vereinigung* zeigt die *boolesche Schnittmenge* deutlich bessere Ergebnisse.

Tabelle 5.2: Vergleich der Parameter für die Schnittkantenberechnung.

Method	True Positive	False Positive	False Negative	Kanten
Referenzkanten	-	-	-	477
Maximale Ausdehnung	139 (29 %)	291	338 (71 %)	430
Boolesche Vereinigung	146 (31 %)	216	331 (69 %)	362
Boolescher Schnitt (1 m)	251 (53 %)	104	226 (47 %)	355
Boolescher Schnitt (0,5 m)	232 (49 %)	123	245 (51 %)	355

Im Folgenden sollen die Ergebnisse der Optimierung der zwei Parameter *Within Perpendicular Distance* (kurz WPD, Punkte von beiden Segmenten innerhalb eines bestimmten senkrechten Abstandes zur Schnittlinie) und *Maximum Consecutive Point Distance* (kurz MCPD, maximal fortlaufender Punktabstand in der Schnittkante) dargestellt werden (vgl. Kap. 3.2). Die bisherigen Ergebnisse nehmen wie erläutert den Standardwert von jeweils 1 m an. Da die Methoden *Maximale Ausdehnung* und *Boolesche Vereinigung* auch durch eine Anpassung dieser Parameter kaum Verbesserungen zeigen, werden nur die Ergebnisse in Kombination mit der *booleschen Schnittmengemethode* im Detail wiedergegeben.

Tabelle 5.3 gibt eine Auswahl verschiedener Parametereinstellungen wieder. Für jede Evaluation wurde eine Fehlertoleranz von 1 m angenommen. Die Ergebnisse zeigen pauschal, dass eine Standardeinstellung von 1 m für beide Parameter kaum verbessert werden kann.

Werden die Werte zu klein gewählt, beispielsweise jeweils 0,5 m, ergeben sich lediglich 31 % korrekt berechnete Schnittkanten. Dies hängt mit der Punktdichte der Laserdaten zusammen. Demnach liegen zu wenige Punkte in einer bestimmten Nachbarschaft, damit eine Schnittkante berechnet wird. Werden stattdessen höhere Werte verwendet, beispielsweise jeweils 2 m, ergeben sich zwar mehr korrekt berechnete Schnittkanten (51 %), jedoch ist die Anzahl der falsch positiven Kanten mit 168 im Vergleich zu anderen Parametertests deutlich höher. Dies liegt an der hohen Anzahl der berechneten Kanten (406), da sich die *boolesche Schnittmenge* mit höheren WPD- und MCPD-Werten

Tabelle 5.3: Vergleich der Parameteroptimierung für die boolesche Schnitt-Operation (Boolean Intersection, 1 m Puffer).

Method	WPD	MCPD	TP	FP	FN	Kanten
Referenzkanten	-	-	-	-	-	477
Boolesche Schnittmenge	1 m	1 m	251 (53 %)	104	226 (47 %)	355
Boolesche Schnittmenge	1,5 m	1 m	250 (52 %)	129	227 (48 %)	379
Boolesche Schnittmenge	0,5 m	1 m	234 (49 %)	72	243 (51 %)	306
Boolesche Schnittmenge	1 m	1,5 m	251 (53 %)	106	226 (47 %)	357
Boolesche Schnittmenge	1 m	0,5 m	241 (51 %)	90	236 (49 %)	331
Boolesche Schnittmenge	0,5 m	0,5 m	146 (31 %)	46	331 (69 %)	192
Boolesche Schnittmenge	2 m	2 m	241 (51 %)	168	236 (49 %)	406
Boolesche Schnittmenge	0,9 m	1,5 m	252 (53 %)	102	225 (47 %)	354

den Ergebnissen von *maximaler Ausdehnung* und *boolescher Vereinigung* angleicht.

Zusätzlich lässt sich feststellen, dass durch einen geringeren WPD-Wert die Anzahl der falsch positiven Schnittkanten verringert wird. Demnach steigt die Wahrscheinlichkeit, dass eine berechnete Schnittkante aus der Punktwolke auch tatsächlich existiert und nicht durch eine fehlerhafte Segmentierung künstlich erzeugt wurde. Die Verbesserung der Ergebnisse hält sich jedoch insgesamt in Grenzen, da auch die Anzahl der korrekt berechneten Schnittkanten durch diesen Parameter beeinflusst wird und insgesamt weniger Kanten erzeugt werden.

Ein höherer MCPD-Wert führt in bestimmten Fällen zu verlängerten Kanten. Abbildung 5.8 zeigt den direkten Vergleich eines MCPD-Wertes mit 1 m (orange) und 1,5 m (blau) mit ansonsten unveränderten Parametern. Die Veränderungen sind jedoch weiterhin gering und hängen, wie auch beim vorherigen Parameter WPD, stark von der lokalen Punktdichte ab.

In Anbetracht der Gesamtanzahl der korrekt bestimmten Schnittkanten sind für den verwendeten Datensatz 0,9 m für WPD und 1,5 m für MCPD die optimalen Werte (vgl. Tab. 5.3). Signifikante Verbesserungen der Ergebnisse konnten jedoch durch Anpassungen der Parameter nicht erzielt werden. Inwieweit diese Werte aus den Daten selbst abgeleitet werden können und ob ein Zusammenhang überhaupt hergestellt werden kann, müssen weiterführende Untersuchungen zeigen.

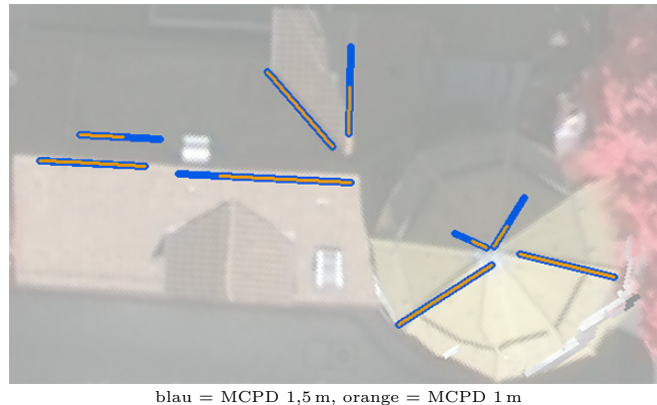


Abbildung 5.8: Optimierung des maximal fortlaufenden Punktabstands (MCPD).

### 5.3 Evaluation des Teilgraph-Matching

Die folgenden Abschnitte beschäftigen sich mit der Auswertung der Ergebnisse des vorgestellten Teilgraph-Matching-Algorithmus aus Kapitel 2.2. Zwar bieten Rottensteiner u. a. (2012) eine Evaluation für die 3D-Gebäuderekonstruktion und Gebäudedetektion des Vaihingen Testdatensatzes an, es existiert jedoch keine Analyse für den in dieser Arbeit umgesetzten Vorschritt. Kaartinen und Hyypä (2006) evaluieren 3D-Gebäuderekonstruktionen anhand von geometrischen Aspekten wie Referenzpunkten und Grundrissplänen und wenden diese ebenfalls nur auf die Endergebnisse an. Eine automatisierte Evaluation vergleichbar mit der Schnittkantenberechnung (vgl. Kap. 5.2) ist demnach schwierig, da keine Referenzdaten existieren und für jede reale Dachtopologie ein entsprechender Graph manuell erstellt werden müsste.

Die nachfolgenden Ergebnisse werden daher durch eine manuelle Überprüfung erstellt, indem die erzeugten Topologiegraphen mit den zu erwartenden Dachgraphen aus den Referenzkanten verglichen werden. Da aus den vorausgehenden Ergebnissen aus Kapitel 5.2 bekannt ist, dass kürzere Schnittkanten nicht immer korrekt erkannt werden, liegt der Hauptaspekt der Überprüfung auf den Dachgrundformen. Korrekt definierte Dachformen mit einem großen Anteil an der Dachfläche werden demnach höher gewichtet als beispielsweise fehlende Dachgauben mit einer geringen Fläche. Im Vergleich mit Rottensteiner u. a. (2012) liegt auch hier die Grenze bei  $10 \text{ m}^2$  pro Dachfläche.

Abbildungen 5.9(a) und 5.9(b) zeigen die Ergebnisse in einer dreidimensionalen Ansicht mit der Punktwolke und als perspektivische Darstellung ohne Punktdaten. Das Ergebnis des Teilgraph-Matchings in Kombination mit dem entsprechenden Luftbild ist in Abbildung 5.10 dargestellt.

Die Berechnung der Qualität (Quality) erfolgt, wie in Rutzinger u. a. (2009) vorgestellt, anhand der Maßeinheiten Vollständigkeit (Completeness) und Korrektheit (Correctness). Die Vollständigkeit wird anhand von Formel 5.1 berechnet und ist der Prozentsatz aller in den Referenzdaten gefundenen Objekte. True Positive (TP) ist die



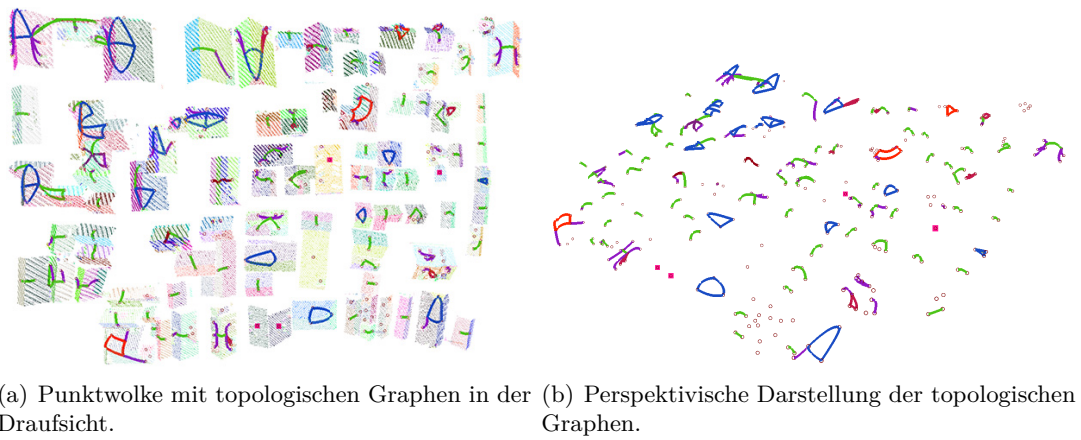


Abbildung 5.9: Ergebnis des Teilgraph-Matchings in einer 3D-Visualisierung.

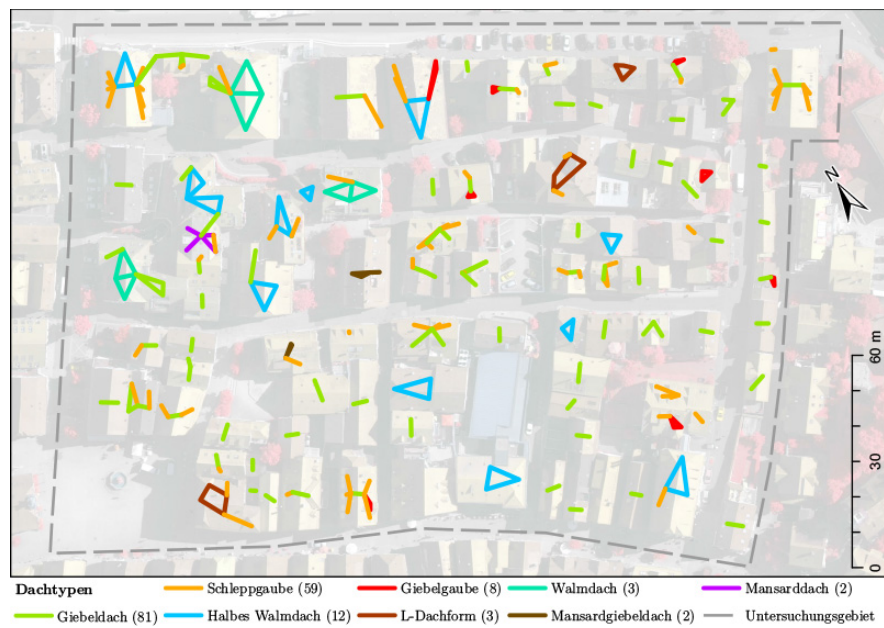


Abbildung 5.10: Ergebnis des Teilgraph-Matchings.

Anzahl aller korrekt bestimmten Teilgraphen. False Negative (FN) gibt die Anzahl der nicht gematchten Teilgraphen der original Dachtopologie an.

$$Completeness = \frac{||TP||}{||TP|| + ||FN||} \quad (5.1)$$

Die Korrektheit wird durch Formel 5.2 bestimmt, wobei False Positive die Anzahl der falsch bestimmten Teilgraphen darstellt. Diese Maßeinheit deutet darauf hin, wie gut die bestimmten Objekte zu den Referenzdaten passen.

$$Correctness = \frac{||TP||}{||TP|| + ||FP||} \quad (5.2)$$

Eine gute Klassifikation sollte dementsprechend beides, eine hohe Vollständigkeit und Korrektheit, besitzen. Die Qualität wird daher, wie in Formel 5.3 zu sehen, durch eine Kombination beider Werte berechnet.

$$Quality = \frac{||TP||}{||TP|| + ||FP|| + ||FN||} \quad (5.3)$$

Tabelle 5.4 zeigt zum einen die Ergebnisse des Teilgraph-Matching unter Einbezug aller Dachflächen, zum anderen die deutlich verbesserten Ergebnisse unter Auslassung aller Dachflächen unter  $10 \text{ m}^2$ . Eine Übersicht der Evaluation der einzelnen Gebäude befindet sich im Anhang in den Tabellen A1 und A2. Trotz einer relativ hohen Anzahl falsch bestimmter oder fehlender Kanten (vgl. Kap. 5.2) werden die entsprechenden Teilgraphen gut erkannt.

Tabelle 5.4: Evaluation des Teilgraph-Matching.

	<b>Completeness</b>	<b>Correctness</b>	<b>Quality</b>
alle Dachflächen	61 %	76 %	57 %
Dachflächen $\geq 10 \text{ m}^2$	74 %	79 %	69 %

Der große Unterschied zwischen den Qualitätsmaßen zeigt, dass kleinere Flächen durchgängig zu Fehlern führen. Dachflächen mit mehr als  $10 \text{ m}^2$  werden gut erkannt, die Korrektheit mit 79% bietet allerdings weiterhin Potential zur Verbesserung der Ergebnisse.

Einfache Dachformen, beispielsweise Satteldächer, werden durchgehend gut erkannt. Komplexe Gebäude werden jedoch durch fehlende Schnittkanten wie beispielsweise in Abbildung 5.11 in falsche Teilgraphen aufgeteilt. In diesem Beispiel wird aus einem Walmdach mit angrenzendem Giebeldach eine L-Dachform, da die berechneten Schnittkanten durch die geringe Punktdichte nicht der Realität entsprechen. Der dabei entstehende topologische Dachgraph wird jedoch korrekt als L-Dachform interpretiert (vgl. Kap. 3.4) und löst dadurch im Endergebnis eine Fehlklassifikation aus.

Fehlerquellen sind häufig unvollständige Teilgraphen, die durch Überlagerung von

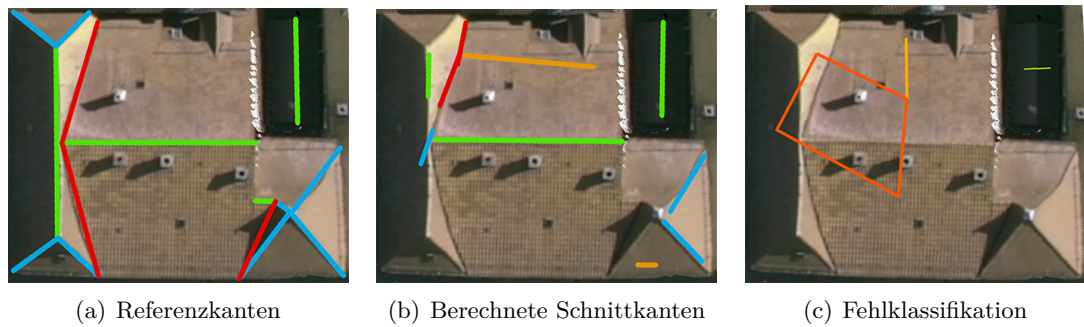


Abbildung 5.11: Fehlklassifikation eines komplexeren Gebäudes.

Vegetation oder anderen Dachflächen entstehen. Abbildung 5.12(a) zeigt beispielsweise ein Satteldach mit einer Giebelgaube. Durch die Überlagerung der Vegetation wird jedoch nur das Satteldach korrekt erkannt, die entsprechenden Flächen der Gaube werden bereits bei der Segmentierung nicht fehlerfrei bestimmt und daher in der Klassifikation nicht berücksichtigt.

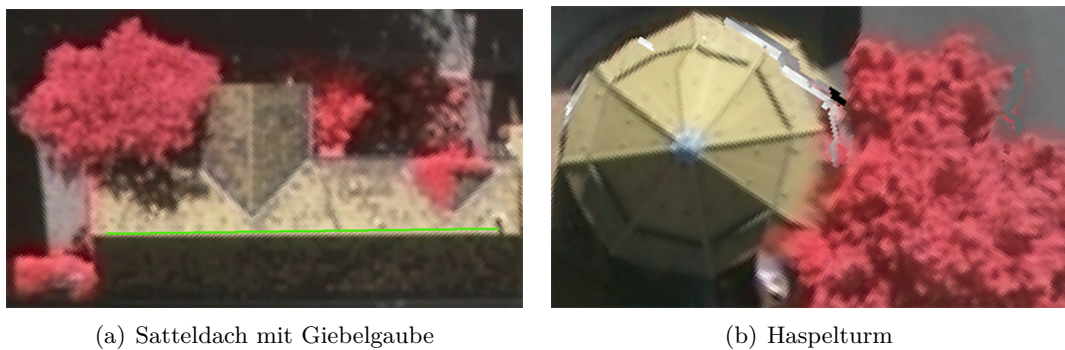
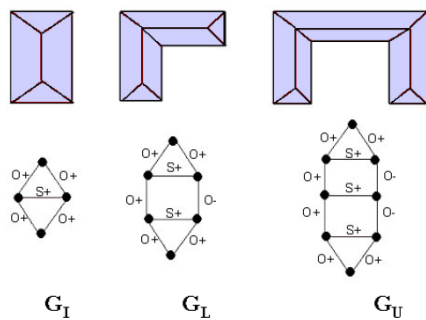


Abbildung 5.12: Fehlerquelle durch Überlagerung von Vegetation.

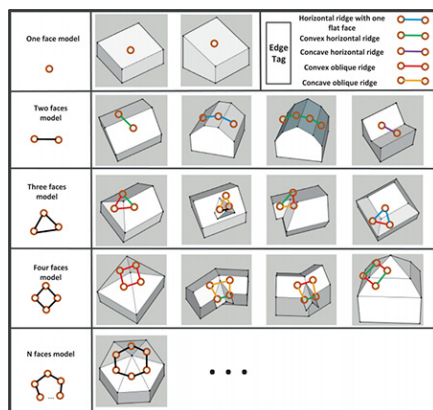
Auch der Haspelturm (vgl. Abb. 5.12(b)) wird teilweise von Vegetation bedeckt, wodurch sich kürzere Schnittkanten ergeben. Ein weiterer Aspekt in diesem Zusammenhang ist die Fehlklassifikation von Dachformen, die nicht in der Zielgraph Bibliothek enthalten sind. Es existiert zwar eine Pyramiden-Dachform mit vier Knoten, jedoch müsste das Turmdach durch acht Knoten repräsentiert werden. Dementsprechend läuft die Klassifikation an dieser Stelle in die Leere und führt zu einer erhöhten Fehlerzahl. Der Einfluss von unterschiedlichen Bibliotheken soll daher im nachfolgenden Kapitel 5.4 weiter erläutert werden.

### 5.4 Vergleich von unterschiedlichen Regelsätzen

Um neben dem Einfluss der Parameter vor dem Matching zusätzlich festzustellen, wie stark sich der Umfang der Zielgraphen Bibliothek auf die Ergebnisse des Matchings auswirkt, werden zusätzlich zu der in Kapitel 3 dargestellten Sammlung von Grundformen ausgewählte Regelsätze der in Kapitel 2.2 vorgestellten graphbasierten Lösungen umgesetzt. Abbildung 5.13 zeigt, welche Zielgraphen oder Gebäudegrundformen in den drei Methoden jeweils eingesetzt werden. Hierbei ist zu beachten, dass natürlich nur Dachformen eingesetzt werden, die mit den in Kapitel 3.5 vorgestellten Regeln umsetzbar sind. So fallen beispielsweise die in Oude Elberink und Vosselman (2009) erläuterten Step Edges, Höhengsprünge zwischen einzelnen Segmenten, weg.



(a) Verma u.a. 2006.



(b) Xiong u.a. 2014.

Roof name	Schematic representation	Graph representation
Gable		
Half hip roof		
Hip roof		
Gambrel roof		
Simple dormer		
Mansard roof type (tilted in single direction)		
Pyramid shape		
L-shape building		
Step edge		
Mansard corner (tilted in double directions)		
Gable extension at (half) hipped roof type		
Gable shaped dormer		
Flat building		-
Shed building		-

(c) Oude Elberink 2009.

Abbildung 5.13: Vergleich verschiedener Bibliotheken für Zielgraphen von Verma u. a. (2006), Oude Elberink (2009) und Xiong u. a. (2014).

Tabelle 5.5 zeigt die für diesen Vergleich übernommenen Zielgraphen. Hervorgehobene Dachtypen werden nur für die Überprüfung definiert und sind nicht Teil der in dieser Arbeit eingesetzten Bibliothek (vgl. Tab. 3.2). Es zeigt sich, dass Oude Elberink (2009) und Xiong u. a. (2014) deutlich mehr Zielgraphen definieren als Verma u. a. (2006). Trotz vieler Übereinstimmungen hat jeder Regelsatz für sich individuelle Kombina-

tionen von allgemeinen und relativ speziellen Dachtypen. Verma u. a. (2006) definieren beispielsweise eine komplexe U-Dachform mit geneigten Dachflächen auf der Giebelseite (U-Shape with hips) und Xiong u. a. (2014) setzen mehrere kleinere Dacherweiterungen (gable extension concave/convex) oder Dachecken (mansard corner) ein.

Tabelle 5.5: Vergleich verschiedener Regelsätze für Zielgraph Bibliotheken (angepasst nach: Verma u. a., 2006, Oude Elberink, 2009, Xiong u. a., 2014).

Dachtyp	Verma	Oude Elberink	Xiong	Albers
gable roof	-	X	X	X
valley	-	-	X	X
mansard	-	X	X	X
gambrel	-	X	X	X
half hip	-	X	X	X
hip	X	X	-	X
pyramid	-	X	X	X
L-Shape	-	X	-	X
shed dormer	-	X	-	X
gable dormer	-	X	X	X
flat/shed roof	X	X	X	X
<b>U-Shape with hips</b>	X	-	-	-
<b>L-Shape with hips</b>	X	-	-	-
<b>gable extension</b>	-	X	X	-
<b>gable ext. concave</b>	-	-	X	-
<b>gable ext. convex</b>	-	-	X	-
<b>mansard corner</b>	-	X	X	-
<b>pyramid corner</b>	-	-	X	-

Die Ergebnisse der Evaluation in Tabelle 5.6 weichen bis auf wenige Ausnahmen nicht von den Erwartungen ab. Eine zu geringe Anzahl von Zielgraphen, wie in Verma u. a. (2006), führt in einem größeren Testdatensatz zu einer geringen Anzahl von positiven Treffern. Da von den vier möglichen Teilgraphen lediglich drei in den Daten vorkommen und entsprechend häufig auftretende Dachtypen (z.B. Satteldächer und Gauben) nicht explizit definiert sind, liegt die Gesamtqualität der Klassifikation lediglich bei 2 %.

Unerwartet sind hingegen die mittelmäßigen Resultate der Bibliothek von Xiong u. a. (2014) mit einer Vollständigkeit von lediglich 49 %, wodurch die Qualität ebenfalls auf ein Maß von 48 % sinkt. Zu diesen schlechten Ergebnissen führt unter anderem das Fehlen des Zielgraph für eine Schleppgaube in diesem Vergleich. Neben Satteldächern ist dies der am häufigsten auftretende Teilgraph im Testdatensatz. Dass die restlichen Zielgraphen nicht zu einer besseren Vollständigkeit führen, lässt sich durch eine geringere Punktdichte erklären. Viele der in der Bibliothek enthaltenen Erweiterungen (z.B. Mansardecken, konkave/konvexe Giebel-Erweiterungen) werden nicht durch die Segmentierung erfasst und daher auch nicht in den topologischen Graphen modelliert.

Die gute Erkennung der übrigen Graphen wird durch den guten Korrektheitswert von 75 % bestätigt und verringert die Wahrscheinlichkeit einer fehlerhaften Umsetzung.

Tabelle 5.6: Ergebnisse unterschiedlicher Zielgraph Bibliotheken.

<b>Regelsatz</b>	<b>Completeness</b>	<b>Correctness</b>	<b>Quality</b>
Verma 2006	2 %	5 %	2 %
Oude Elberink 2009	61 %	81 %	59 %
Xiong 2014	49 %	75 %	48 %
Albers 2014	61 %	76 %	57 %

Der verwendete Regelsatz von Oude Elberink (2009) zeigt die besten Resultate und ist mit den Ergebnissen in Kapitel 5.3 vergleichbar. Dies liegt unter anderem an den nahezu deckungsgleichen Zielgraphen, die hier jedoch etwas umfangreicher sind. Der Prozentsatz der Vollständigkeit kann sicherlich durch die in Abbildung 5.13 dargestellten, jedoch hier nicht implementierten Step Edges weiter angehoben werden.

Insgesamt machen die Ergebnisse deutlich, dass eine erfolgreiche Klassifikation stark von den vorgegebenen Zielgraphen und deren implementierten Regeln abhängig ist. Der Umfang einer Bibliothek allein reicht jedoch nicht aus. Datensätze aus unterschiedlichen Regionen der Welt besitzen jeweils typische Dachformen, die sich in den eingesetzten Bibliotheken widerspiegeln müssen. Die von Xiong u. a. (2014) vorgeschlagene Aufteilung von komplexeren Graphen in simplere Teilgraphen ist ein guter Ansatz, jedoch muss jedes Dachprimitiv manuell definiert werden. Letztendlich muss ein Anwender entscheiden, welche Zielgraphen zu besseren Ergebnissen führen, da eine global verfügbare Bibliothek mit allen möglichen topologischen Beziehungen von Dachflächen schwer umzusetzen ist.

## 5.5 Ergebnisdiskussion

Wie Oude Elberink (2010) anmerkt, können rekonstruierte Modelle nur dann sachgemäß eingesetzt werden, wenn deren Qualität bekannt ist. Die vorangehenden Abschnitte zeigen, wie bereits die Vorschritte einer 3D-Gebäuderekonstruktion evaluiert werden. Unterschiedliche Qualitätsmaße machen deutlich, wie gut oder schlecht sich bestimmte Parameter auf die Ergebnisse auswirken. Laut Rottensteiner u. a. (2012) werden Werte für die Vollständigkeit (Completeness) von 70 % und für die Korrektheit von 85 % benötigt, um in der realen Praxis von Bedeutung zu sein. Diese Werte werden nicht durchgängig erreicht, jedoch zeigt die umgesetzte Methode in einigen Bereichen Potential für Verbesserungen.

Bereits bei der Berechnung der Schnittkanten und der nachfolgenden Bestimmung der Kantentypen werden Fehler erzeugt. Da die Schnittkanten der Dachflächen oft nicht der Realität entsprechen, kann die Segmentierung beispielsweise durch ein Subsurface-

Growing-Algorithmus verbessert werden. Die dabei entstehenden adjazenten Beziehungen zwischen den Segmenten bilden die real existierende Topologie deutlich besser ab (vgl. Kada und Wichmann, 2012).

Auch eine Anpassung der Evaluation kann zu anderen Ergebnissen führen, da diese keinen Anspruch auf vollständige Korrektheit erhebt. Die Referenzdaten wurden durch die in Kapitel 5.1 vorgestellte Datengrundlage erstellt, weitere Informationen werden nicht verwendet. Überprüfte und validierte Ground-Truth-Daten können hierbei kritische Fragen klären. Die automatisierte Evaluation basiert auf einer Fehlertoleranz, die durch einen Puffer realisiert wird. Anstatt einer vollständigen Überlagerung könnte hier auch eine Überdeckung mit einem definierten Schwellwert geprüft werden, da viele der berechneten Schnittkanten durch die Punktdichte nicht dem exakt gleichen Verlauf folgen.

Wie Kaartinen und Hyypä (2006) erläutern, hat die Laserpunktdichte eine signifikante Auswirkung auf das Ergebnis aller bisher untersuchten Methoden. Daher kann auch hier insgesamt davon ausgegangen werden, dass eine erhöhte Anzahl von Laserpunkten die Ergebnisse positiv beeinflussen wird.

Der Zusammenhang von optimalen Parametern und den eingesetzten Daten stellt einen interessanten Forschungsansatz dar. Bisher werden Schwellwerte und Berechnungsoperationen durch einen Anwender anhand von a priori Wissen oder iterativen Tests definiert. Weitere Untersuchungen werden zeigen, ob sich Parameter lokal aus den Daten ableiten lassen. Dies würde zur Automatisierung beitragen und den hier vorgestellten, hauptsächlich modellgestützten Ansatz zu einer hybriden Methode erweitern (vgl. Kap. 2.1.3).

Die vorgestellten Ergebnisse des Teilgraph-Matchings sind natürlich durch die vorherige Schnittkantenberechnung und Typisierung beeinflusst. Durch eine fehlerhafte Topologie treffen nicht immer alle definierten Regeln der Zielgraphen zu, das Matching zeigt jedoch gute Ergebnisse. Unabhängig von den vorherigen Aspekten, kann auch das Teilgraph-Matching weiter verbessert werden. Eine Erweiterung des in Abbildung 3.1 vorgestellten Ablaufs durch eine erneute Klassifizierung mit weniger restriktiven Regeln auf nicht zu einem Zielgraphen zugewiesene Kanten kann zu weiteren positiven Treffern führen. Teilgraphen, denen beispielsweise lediglich eine Kante zu einer korrekten Zuweisung zu einem Zielgraphen fehlt, werden andernfalls nicht als Treffer gezählt.

In Kapitel 3.5 werden Regeln für die Zuweisung von Teilgraphen zu Zielgraphen vorgestellt. Hierbei hängt ein Treffer nicht allein von einem identischen Graph-Modell ab, auch zusätzliche geometrische Regeln der Objekte spielen eine Rolle. Diese Definitionen sind nicht immer optimal. Bounding-Boxen werden bisher an den Achsen ausgerichtet (engl. Axis-Aligned Bounding Box) und nicht am Objekt selber orientiert (engl. Oriented Bounding Box). Dadurch entstehen vor allem bei Segmenten mit einer 45° Ausrichtung Probleme, da die umschließende Hülle eine größere Fläche einnimmt

als die tatsächliche Dachfläche. Die Kontrolle, ob ein Segment von einer adjazenten Fläche umschlossen wird, ist so in einigen Fällen fehlerbehaftet.

Weiterhin fehlen Unterscheidungen von spezielleren Dachtypen, wie bei Oude Elberink und Vosselman (2009) oder Xiong u. a. (2014). Diese führen zu mehr Treffern, lassen jedoch die Bibliothek für Zielgraphen in dieser Arbeit sehr stark anschwellen und erhöhen die Gefahr von zusätzlichen falsch positiven Treffern. Ein Beispiel ist unter anderem die Unterscheidung zwischen normalen Walmdächern und Krüppelwalmdächern, deren Traufe oberhalb des Hauptdaches liegt.



## 6 Fazit und Ausblick

Abschließend wird in Hinblick auf die in Kapitel 1.1 genannten Forschungsfragen aufgezeigt, welche Ziele in dieser Arbeit erreicht wurden und wo sich Grenzen sowie mögliche Anknüpfungspunkte aufgetan haben.

Je definierten Forschungsaspekt werden hierbei die jeweiligen Erkenntnisse zusammengefasst und bewertet.

- Umsetzung eines Teilgraph-Matchings und somit die Zuweisung von semantischen Informationen zu Objekten in 3D-Gebäudemodellen

Diese Arbeit hat einen Ansatz zur automatisierten Rekonstruktion für die 3D-Stadtmodellierung aus einer Punktwolke präsentiert und umgesetzt. Die graphenbasierte Erkennung und topologische Darstellung von Dachformen ist im Detail erläutert, wobei Probleme und Fehlerquellen identifiziert werden konnten.

- Untersuchen der Abhängigkeit des Verfahrens von der Bibliothek für Zielgraphen

In Kapitel 5.4 wird gezeigt, wie stark das Matching von der zugrunde liegenden Bibliothek für Zielgraphen abhängig ist, indem vier unterschiedliche Regelsätze verglichen werden. Allgemein stellen sich viele Regeln zur Zielgraphbestimmung als zu restriktiv heraus. Eine Erweiterung oder Deregulierung der Regelsätze für bestimmte Gebäude kann je nach Datengrundlage zu einer höheren Trefferquote führen. Auch eine Verbesserung der Regelsätze durch eine genauere Parameterbestimmung und die Frage, inwieweit diese aus den Daten abgeleitet werden können, sollten Schwerpunkte weiterer Untersuchungen sein.

- Qualitative Beurteilung des Teilgraph-Matchings und Evaluation der Ergebnisse der Zwischenschritte

Der Hauptbeitrag dieser Arbeit liegt in der Evaluation der Schnittkantenberechnung und der darauf folgenden Typisierung und Modellierung der topologischen Graphen. Durch die Erstellung eines Referenzdatensatzes findet eine nahezu vollständig automatisierte Überprüfung statt. Ein Schwachpunkt des Teilgraph-Matchings sind sicherlich Höhensprünge zwischen Dachflächen (Step-Edges), die für diese Arbeit nicht implementiert wurden, jedoch für bestimmte Dachformen benötigt werden. Für eine Verminderung der Unter- oder Übersegmentierung von Dachflächen aus Laserdaten, die

im Verlauf der Modellierung von topologischen Graphen zu Fehlern führt, eignet sich beispielsweise eine Sub-Surface-Segmentierung (vgl. Kada und Wichmann, 2012).

- Optimierung für die Berechnung der Schnittkantenparameter und Analyse der Abhängigkeit der Klassifizierung von Länge der Schnittkante

Anhand der berechneten Qualitätsmerkmale werden unterschiedliche Parameterkombinationen getestet und optimiert. In Kapitel 5.2 wird gezeigt, welche Parameter für den vorgestellten Datensatz zu den besten Ergebnissen führen. Dabei stellt sich heraus, dass eine Berechnung der Schnittkanten anhand einer booleschen Schnittoperation im Vergleich mit anderen Operationen zu besser modellierten topologischen Graphen führt.

- Identifizierung typischer Dachformen und Ableitung einer sinnvollen Klassifizierung von Schnittkantentypen

Eine komplette Abdeckung aller möglichen Dachformen ist nahezu unmöglich, je nach Punktdichte der Laserdaten und Untersuchungsgebiet liefern bestimmte Grundformen jedoch gute Ergebnisse. In Kapitel 3 werden elf typische Dachgrundformen definiert, die durch insgesamt sieben Schnittkantentypen beschrieben werden.

- Automatisierung des Verfahrens prüfen und ermitteln, ob sich durch das Ableiten von Parametern aus den Daten Vorteile ergeben

Vorteile dieses Verfahrens liegen in der schnellen Berechnungszeit und der starken Automatisierung. Zwar erfordern die Zielgraphen und die entsprechenden Regeln initial einigen Aufwand, können jedoch aufgrund ihrer Eigenschaften auch auf unterschiedliche Datensätze angewendet werden. Da viele Schwellwerte für die Bestimmung der Zielgraphen verwendet werden, ist das Ableiten von lokalen Schwellwerten aus den Daten sinnvoll und erleichtert den Einsatz von differierenden Punktwolken.

- Verbesserte Interpretation von Laserdaten und topologischen Graphen durch 3D-Visualisierung und Fusion der eingesetzten Daten

Ein Prototyp zur Visualisierung der topologischen Graphen wird in Kapitel 4 gezeigt. Aufgrund von der begrenzten Verbreitung von Algorithmen zum Zeichnen von geographisch eingeschränkten Graphen in bestehenden Programmbibliotheken wurden nur grundlegende Funktionen implementiert. Möglichkeiten und Probleme bei einer zukünftigen Weiterentwicklung werden aufgezeigt.

Insgesamt kann der Vorgelegte Ansatz für die graphenbasierte Erkennung von Dachformen in Punktwolken jedoch noch nicht für eine gute Gebäuderekonstruktion erhalten, da bestimmte Qualitätswerte für die Korrektheit und Vollständigkeit, wie in

Kapitel 5.3 gezeigt, bisher nicht erreicht werden. Die Qualität der berechneten Schnittkanten ist zwar gering, kann jedoch durch eine höhere Punktdichte und eine verbesserte Segmentierung erhöht werden.

Interessante Erweiterungen von graphenbasierten Ansätzen zeigen unter anderem Engels u. a. (2008). Eine Reorganisation von häufig auftretenden Fehlern in der Topologie führt zu eindeutigeren topologischen Graphen und somit zu einem korrekteren Ergebnis des Matchings, da Ausreißer insgesamt vermieden werden. Einen ähnlichen Ansatz schlagen Xiong u. a. (2014) vor, die häufige Fehler durch eine Graph-Correction-Library auffangen und diese durch Einfügen oder Entfernen von neuen Knoten und Kanten beseitigen. Weiterentwicklungen sollten daher einen hybriden Ansatz verfolgen, indem der hier stark modellgestützte Ablauf in stärkerer Relation zu den Daten selbst gesetzt wird.

# Literatur

- Abellanas, M., A. Aiello, G.H. Penalver und R. Silveira (2005):** „Network drawing with geographical constraints on vertices“. In: *XI Encuentros de Geometria Computacional*. Santander, Spanien.
- Ameri, B. und D. Fritsch (2000):** „Automatic 3D building reconstruction using plane-roof structure“. In: *Proceedings of ASPRS Annual Conference*. Washington, DC, S. 22–26.
- Brandes, U., G. Shubina und R. Tamassia (2000):** „Improving Angular Resolution in Visualizations of Geographic Networks“. In: *Data visualization 2000: Proceedings of the Joint Eurographics and IEEE TCVG Symposium on Visualization*. Hrsg. von W. de Leeuw und R. van Liere. Amsterdam, The Netherlands.
- Brenner, C. (2000):** „Towards fully automatic generation of city models“. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* Bd. 33 Nr. B3, S. 85–92.
- Brenner, C. (2005):** „Building reconstruction from images and laser scanning“. In: *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* Bd. 6, S. 187–1998.
- Brenner, C. (2010):** „Building Extraction“. In: *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Hrsg. von G. Vosselman und H.-G. Maas. Scotland, UK: Whittles Publishing. Kap. 5, S. 169–207.
- Cramer, M. (2010):** „The DGPF-Test on Digital Airborne Camera Evaluation - Overview and Test Design“. In: *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation* Bd. 2010 Nr. 2, S. 73–82.
- de Lange, N. (2013):** *Geoinformatik. In Theorie und Praxis*. 3. Aufl. Berlin: Springer Spektrum.
- Di Battista, G., P. Eades, R. Tamassia und I. G. Tollis (1999):** *Graph Drawing. Algorithms for the Visualization of Graphs*. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall.
- Engels, J., H. Arefi und M. Hahn (2008):** „Generation of Roof Topologies Using Plane Fitting with RANSAC“. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* Bd. 37 Nr. B3a, S. 119–126.
- Green, P. (1995):** „Reversible Jump Markov Chains Monte Carlo computation and Bayesian model determination“. In: *Biometrika* Bd. 82 Nr. 4, S. 711–732.

- Haala, N., H. Hastedt, K. Wolf, C. Ressel und S. Baltrusch (2010):** „Digital Photogrammetric Camera Evaluation - Generation of Digital Elevation Models“. In: *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation* Bd. 2010 Nr. 2, S. 99–115.
- Haala, N. und M. Kada (2010):** „An update on automatic 3D building reconstruction“. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* Bd. 65, S. 570–580.
- Henn, A., G. Gröger, V. Stroh und Plümer (2013):** „Model driven reconstruction of roof from sparse LIDAR point clouds“. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* Bd. 76, S. 17–29.
- Huang, H., C. Brenner und M. Sester (2011):** „3D Building Roof Reconstruction from Point Clouds via Generative Models“. In: *Proceedings of the 19th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems*. GIS '11. Chicago, IL, S. 16–24.
- Huang, H., C. Brenner und M. Sester (2013):** „A generative statistical approach to automatic 3D building roof reconstruction from laser scanning data“. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* Bd. 79, S. 29–43.
- Jwa, Y., G. Sohn, V. Tao und W. Cho (2008):** „An implicit geometric regularization of 3D building shape using airborne LiDAR Data“. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* Bd. 37 Nr. B3a, S. 69–76.
- Kaartinen, H. und J. Hyypä (2006):** *Evaluation of building extraction*. Techn. Ber. 50. European Spatial Data Research.
- Kada, M. und L. McKinley (2009):** „3D Building Reconstruction from LIDAR Based on a Cell Decomposition Approach“. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* Bd. 38 Nr. 3/W4, S. 47–52.
- Kada, M. und A. Wichmann (2012):** „Sub-Surface Growing and Boundary Generalization for 3D Building Reconstruction“. In: *The International Annals of Photogrammetry and Remote Sensing* Bd. 1 Nr. 3, S. 233–238.
- Kobourov, S. G. (2013):** „Force-Directed Drawing Algorithms“. In: *Handbook of Graph Drawing and Visualization*. Hrsg. von R. Tamassia. CRC Press. Kap. 12, S. 383–408.
- Lafarge, F., X. Descombes, J. Zerubia und M. Pierrot-Deseilligny (2008):** „Automatic building extraction from DEMs using an object approach and application to the 3D-city modeling“. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* Bd. 63 Nr. 3, S. 365–381.

- Lafarge, F., X. Descombes, J. Zerubia und M. Pierrot-Deseilligny (2010a):** „Structural approach for building reconstruction from a single DSM“. In: *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence* Bd. 32 Nr. 1, S. 135–147.
- Lafarge, F., R. Keriven, M. Brédif und Vu Hoang Hiep (2010b):** „Hybrid multi-view reconstruction by Jump-Diffusion“. In: *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2010 IEEE Conference on*. San Francisco, CA, S. 350–357.
- Lafarge, F. und C. Mallet (2012):** „Creating Large-Scale City Models from 3D-Point Clouds: a Robust Approach with Hybrid Representation“. In: *International Journal of Computer Vision* Bd. 99 Nr. 1, S. 69–85.
- Lambert, A., R. Bourqui und D. Auber (2010):** „3D Edge Bundling for Geographical Data Visualization“. In: *Information Visualisation (IV), 2010 14th International Conference*, S. 329–335.
- Landesberger, T. von, A. Kuijper, T. Schreck, J. Kohlhammer, J.J. van Wijk, J.-D. Fekete und D.W. Fellner (2011):** „Visual Analysis of Large Graphs: State-of-the-Art and Future Research Challenges“. In: *Computer Graphics Forum* Bd. 30 Nr. 6, S. 1719–1749.
- Milde, J. und C. Brenner (2009):** „Graph-based Modeling of Building Roofs“. In: *Proceedings of 12th AGILE Conference on GIScience*. Hannover, Germany.
- Milde, J., Y. Zhang, C. Brenner, L. Plümer und M. Sester (2008):** „Building Reconstruction Using a Structural Description Based on a Formal Grammar“. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* Bd. 37 Nr. B3B, S. 227–232.
- Nollenburg, M. und A. Wolff (2011):** „Drawing and Labeling High-Quality Metro Maps by Mixed-Integer Programming“. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* Bd. 17 Nr. 5, S. 626–641.
- Oude Elberink, S. (2009):** „Target graph matching for building reconstruction“. In: *Proceedings of Laser scanning '09 : ISPRS*. Hrsg. von F. Bretar, M. Pierrot-Deseilligny und M.G. Vosselman. Bd. 38. 3/W8. ISPRS. Paris, France, S. 49–54.
- Oude Elberink, S. (2010):** *Acquisition of 3D Topography - Automated 3D road and building reconstruction using airborne laser scanner data and topographic maps*. Publications on Geodesy 74. Delft, die Niederlande: Netherlands Geodetic Commission.
- Oude Elberink, S. und G. Vosselman (2009):** „Building Reconstruction by Target Based Graph Matching on Incomplete Laser Data: Analysis and Limitations“. In: *Sensors* Bd. 9, S. 6101–6118.

- Perera, S. N., H. Nalani und H.-G. Maas (2012):** „An automated method for 3D roof outline generation and regularization in airborne laser scanner data“. In: *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* Bd. 1 Nr. 3, S. 281–286.
- Pu, S. und G. Vosselman (2009):** „Knowledge based reconstruction of building models from terrestrial laser scanning data“. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* Bd. 64 Nr. 6, S. 575–584.
- Rodgers, P. (2005):** „Graph Drawing Techniques for Geographic Visualization“. In: *Exploring Geovisualization*. Hrsg. von J. Dykes, A.M. MacEachren und M.-J. Kraak. Amsterdam u.a.: Elsevier. Kap. 7, S. 143–158.
- Rottensteiner, F. (2003):** „Automatic Generation of High-Quality Building Models from Lidar Data“. In: *IEEE Computer Graphics and Applications* Bd. 23 Nr. 6, S. 42–50.
- Rottensteiner, F. (2006):** „Consistent estimation of building parameters considering geometric regularities by soft constraints“. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* Bd. 36 Nr. 3, S. 13–18.
- Rottensteiner, F., G. Sohn, J. Jung, M. Gerke, C. Baillard, S. Benitez und U. Breitkopf (2012):** „The ISPRS Benchmark on Urban Object Classification and 3D Building Reconstruction“. In: *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* Bd. 1 Nr. 3, S. 293–298.
- Rottensteiner, F., J. Trinder, S. Clode und K. Kubik (2005):** „Automated Delineation of Roof PPlane from LIDAR Data“. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* Bd. 36 Nr. 3/W19, S. 221–226.
- Rutzinger, M., F. Rottensteiner und N. Pfeifer (2009):** „A Comparison of Evaluation Techniques for Building Extraction From Airborne Laser Scanning“. In: *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* Bd. 2 Nr. 1, S. 11–20.
- Sampath, A. und J. Shan (2010):** „Segmentation and Reconstruction of Polyhedral Building Roofs From Aerial Lidar Point Clouds“. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* Bd. 48 Nr. 3, S. 1554–1567.
- Schölkopf, B. und A.J. Smola (2002):** *Learning with Kernels. Support Vector Machines, Regularization, Optimization, and Beyond*. Cambridge, USA: MIT Press.
- Schwalbe, E., H.-G. Maas und F. Seidel (2005):** „3D building model generation from airborne laser scanner data using 2D GIS data and orthogonal point cloud projections“. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* Bd. 36 Nr. 3/W19, S. 209–214.

- Shan, J. und C. K. Toth (2009):** *Topographic Laser Ranging and Scanning. Principles and Processing*. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- SIG 3D - AG Qualität (2013):** *Handbuch für die Modellierung von 3D Objekten. Teil 2 - Modellierung Gebäude (LOD1, LOD2 und LOD3)*. GDI-DE.
- Sohn, G., X. Huang und V. Tao (2008):** „Using a Binary Space Partitioning Tree for Reconstructing Polyhedral Building Models from Airborne Lidar Data“. In: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* Bd. 74 Nr. 11, S. 1425–1438.
- Sohn, G., Y. Jwa, J. Jung und H. Kim (2012):** „An Implicit Regularization for 3D Building Rooftop Modelling using Airborne LIDAR Data“. In: *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* Bd. 1 Nr. 3, S. 305–310.
- Tarsha-Kurdi, F., T. Landes und P. Grussenmeyer (2008):** „Extended RAN-SAC algorithm for automatic detection of building roof planes from LIDAR data“. In: *The Photogrammetric Journal of Finland* Bd. 21 Nr. 1, S. 97–109.
- Tarsha-Kurdi, F., T. Landes, P. Grussenmeyer und M. Koehl (2007):** „Model-Driven and Data-Driven Approaches Using LIDAR Data: Analysis and Comparison“. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* Bd. 36 Nr. 3/W49A, S. 87–92.
- Verma, V., R. Kumar und S. Hsu (2006):** „3D Building Detection and Modeling from Aerial LIDAR Data“. In: *Proceedings of the 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'06)*. Hrsg. von IEEE Computer Society. Washington, DC, S. 2213–2220.
- Vosselman, G. (1999):** „Building Reconstruction Using Planar Faces in Very High Density Data“. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* Bd. 32 Nr. 3/2W5, S. 87–92.
- Vosselman, G. und S. Dijkman (2001):** „3D Building Model Reconstruction from Point Clouds and Ground Plans“. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* Bd. 34 Nr. 3/W4, S. 37–44.
- Vosselman, G., B. G.H. Gorte, G. Sithole und T. Rabbani (2004):** „Recognising structure in laser scanner point clouds“. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* Bd. 46 Nr. 8/W2, S. 33–38.
- Vosselman, G. und H.-G. Maas (2010):** *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Dunbeath, Schottland: Whittles Publishing.
- Wolff, A. (2013):** „Graph drawing and cartography“. In: *Handbook of Graph Drawing and Visualization*. Hrsg. von R. Tamassia. CRC Press. Kap. 23, S. 697–736.



**Xiong, B., S. Oude Elberink und G. Vosselman (2014):** „A graph edit dictionary for correcting errors in roof topology graphs reconstructed from point clouds“. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. In Druck.

# Anhang

Tabelle A1: Evaluation des Teilgraph-Matching mit allen Dachflächen.

Geb.-Nr.	TP	FP	FN	Compl	Corr	Qual	Geb.-Nr.	TP	FP	FN	Compl	Corr	Qual
0	1	0	0	100	100	100	43	3	0	2	60	100	60
1	2	4	1	67	33	29	44	3	0	0	100	100	100
2	3	1	0	100	75	75	45	1	0	0	100	100	100
3	1	1	0	100	50	50	46	1	0	1	50	100	50
4	1	0	0	100	100	100	47	1	0	0	100	100	100
5	2	0	0	100	100	100	48	1	0	0	100	100	100
6	1	0	0	100	100	100	49	2	1	1	67	67	50
7	3	0	0	100	100	100	50	1	0	0	100	100	100
8	1	1	0	100	50	50	51	3	0	2	60	100	60
9	0	0	4	0	0	0	52	1	0	1	50	100	50
10	7	1	5	58	88	54	53	1	2	3	25	33	17
11	15	3	4	79	83	68	54	1	0	0	100	100	100
12	1	2	3	25	33	17	55	1	0	0	100	100	100
13	2	0	4	33	100	33	56	0	1	2	0	0	0
14	1	0	0	100	100	100	57	2	0	1	67	100	67
15	3	0	2	60	100	60	58	2	1	3	40	67	33
16	2	0	4	33	100	33	59	0	0	3	0	0	0
17	1	0	0	100	100	100	60	1	0	1	50	100	50
18	7	0	4	64	100	64	61	0	1	1	0	0	0
19	1	0	1	50	100	50	62	1	0	1	50	100	50
20	1	0	0	100	100	100	63	6	1	2	75	86	67
21	2	1	2	50	67	40	64	2	3	5	29	40	20
22	1	1	3	25	50	20	65	1	0	1	50	100	50
23	1	0	2	33	100	33	66	1	1	4	20	50	17
24	0	0	5	0	0	0	67	1	0	0	100	100	100
25	0	0	4	0	0	0	68	2	0	2	50	100	50
26	1	0	0	100	100	100	69	1	0	0	100	100	100
27	5	0	2	71	100	71	70	0	2	5	0	0	0
28	1	0	0	100	100	100	71	1	0	4	20	100	20
29	0	0	1	0	0	0	72	1	0	0	100	100	100
30	1	0	1	50	100	50	73	1	0	0	100	100	100
31	2	1	0	100	67	67	74	2	0	0	100	100	100
32	2	2	1	67	50	40	75	1	0	0	100	100	100
33	3	1	0	100	75	75	76	1	1	1	50	50	33
34	0	1	1	0	0	0	77	2	0	12	14	100	14
35	2	0	0	100	100	100	78	8	0	8	50	100	50
36	4	0	0	100	100	100	79	1	0	2	33	100	33
37	1	0	0	100	100	100	80	0	0	2	0	0	0
38	3	0	1	75	100	75	81	1	1	2	33	50	25
39	4	0	6	40	100	40	82	1	0	1	50	100	50
40	2	0	1	67	100	67	83	1	0	1	50	100	50
41	0	0	3	0	0	0	84	1	0	0	100	100	100
42	0	1	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle A2: Evaluation des Teilgraph-Matching mit Dachflächen  $\geq 10\text{m}^2$ .

Geb.-Nr.	TP	FP	FN	Compl	Corr	Qual	Geb.-Nr.	TP	FP	FN	Compl	Corr	Qual
0	1	0	0	100	100	100	43	3	0	2	60	100	60
1	1	4	0	100	20	20	44	2	0	0	100	100	100
2	2	1	0	100	67	67	45	1	0	0	100	100	100
3	1	1	0	100	50	50	46	1	0	0	100	100	100
4	1	0	0	100	100	100	47	1	0	0	100	100	100
5	1	0	0	100	100	100	48	1	0	0	100	100	100
6	1	0	0	100	100	100	49	2	1	1	67	67	50
7	3	0	0	100	100	100	50	1	0	0	100	100	100
8	1	1	0	100	50	50	51	1	0	0	100	100	100
9	0	0	4	0	0	0	52	1	0	0	100	100	100
10	6	1	3	67	86	60	53	1	0	0	100	100	100
11	4	0	2	67	100	67	54	1	0	0	100	100	100
12	1	1	3	25	50	20	55	1	0	0	100	100	100
13	2	0	1	67	100	67	56	0	1	2	0	0	0
14	1	0	0	100	100	100	57	2	0	1	67	100	67
15	2	0	0	100	100	100	58	2	1	2	50	67	40
16	2	0	1	67	100	67	59	0	0	3	0	0	0
17	1	0	0	100	100	100	60	1	0	0	100	100	100
18	2	0	0	100	100	100	61	1	0	0	100	100	100
19	1	0	1	50	100	50	62	1	0	1	50	100	50
20	1	0	0	100	100	100	63	1	0	0	100	100	100
21	2	1	0	100	67	67	64	2	3	5	29	40	20
22	1	1	0	100	50	50	65	1	0	0	100	100	100
23	1	0	0	100	100	100	66	1	1	3	25	50	20
24	0	0	1	0	0	0	67	1	0	0	100	100	100
25	0	0	0	0	0	0	68	2	0	2	50	100	50
26	1	0	0	100	100	100	69	1	0	0	100	100	100
27	3	0	2	60	100	60	70	0	2	2	0	0	0
28	1	0	0	100	100	100	71	1	0	1	50	100	50
29	0	0	1	0	0	0	72	1	0	0	100	100	100
30	1	0	1	50	100	50	73	1	0	0	100	100	100
31	2	0	0	100	100	100	74	2	0	0	100	100	100
32	2	1	1	67	67	50	75	1	0	0	100	100	100
33	3	0	0	100	100	100	76	1	1	1	50	50	33
34	0	1	0	0	0	0	77	1	0	0	100	100	100
35	2	0	0	100	100	100	78	1	0	2	33	100	33
36	2	0	0	100	100	100	79	1	0	0	100	100	100
37	1	0	0	100	100	100	80	0	0	2	0	0	0
38	2	0	0	100	100	100	81	1	1	1	50	50	33
39	1	0	1	50	100	50	82	1	0	0	100	100	100
40	1	0	0	100	100	100	83	1	0	1	50	100	50
41	0	0	2	0	0	0	84	1	0	0	100	100	100
42	0	1	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-



Abbildung A1: Gesamtübersicht des Untersuchungsgebietes Vahingen an der Enz (DE).

## **Inhalt des beigefügten Datenträgers**

- Quellcode des Teilgraph-Matchings
- Quellcode des 3D-Web-Viewers
- Quellcode eingesetzter Skripte
- Digitale Version dieser Arbeit

## Erklärung zur selbständigen Abfassung der Master-Arbeit

**Name:** Bastian Albers

**Geburtsdatum:** 29.12.1988

**Matrikel-Nummer:** 937059

**Titel der Master-Arbeit:** Graphenbasierte Erkennung und topologische Darstellung von Dachformen in Punktwolken zur automatischen Rekonstruktion von 3D-Stadtmodellen.

Ich versichere, dass ich die eingereichte Master-Arbeit selbstständig und ohne unerlaubte Hilfe verfasst habe. Anderer als der von mir angegebenen Hilfsmittel und Schriften habe ich mich nicht bedient. Alle wörtlichen oder sinngemäß den Schriften anderer Autoren entnommenen Stellen habe ich kenntlich gemacht.

.....  
Ort, Datum

.....  
Unterschrift