



universität
wien

Diplomarbeit

TITEL DER DIPLOMARBEIT

„Ressourceneffiziente Modellierungsstrategie zur Generierung von Dachflächen für 3D- Stadtmodelle“

Verfasser

Christian SAM

Angestrebter akademischer Grad

Magister der Naturwissenschaften

Wien, im Dezember 2009

Studienkennzahl lt. Studienblatt: A 455

Studienrichtung lt. Studienblatt: Kartographie und Geoinformation

Betreuer: Ass.-Prof. Mag. Dr. Andreas Riedl

Inhalt

Inhalt.....	i
Abbildungsverzeichnis	iv
Tabellenverzeichnis	viii
Kurzfassung	ix
1 Einleitung.....	1
1.1 Forschungsfrage	2
1.2 Arbeitsübersicht.....	3
2 Grundlagen der 3D-Dachmodellierung	4
2.1 3D-Stadtmodelle.....	4
2.1.1 Definition.....	5
2.1.2 Inhalte.....	5
2.2 Dachflächen.....	6
2.2.1 Definition.....	6
2.2.2 Dachelemente	8
2.2.3 Dachformen	8
2.2.4 Gauben	10
2.3 Datengrundlagen.....	11
2.3.1 Einleitung	11
2.3.2 Kataster.....	13
2.3.3 Luft-/Satellitenbilder	15
2.3.4 Digitales Geländemodell	17
2.3.5 Orthophotos.....	19
2.4 Detaillierungsgrade.....	21
2.4.1 Special Interest Group 3D	21
2.4.2 Level of Detail.....	22
2.5 Anwendungsbereiche	25

2.5.1	Visualisierung.....	25
2.5.2	Analyse.....	29
3	Methoden und Verfahren zur Erstellung von Dachflächenmodellen	31
3.1	Übersicht des Erstellungsvorganges.....	31
3.2	Methoden zur Auswertung.....	32
3.2.1	Photogrammetrie	32
3.2.2	Laserscanner-Auswertung.....	35
3.2.3	Dachausmittlung.....	38
3.3	Modelle für Dachflächen.....	41
3.3.1	Verfahrensbezogenes Modell	41
3.3.2	Darstellungsbezogenes Modell.....	43
3.4	Verfahren zur Modellerstellung	45
3.4.1	Photogrammetrie und Prototypen-/Polyedermodell.....	45
3.4.2	Laserscanner-Auswertung und Polyedermodell.....	50
3.4.3	Dachausmittlung und Konstruktives Komponentenmodell.....	56
4	Exemplarische Implementierung eines Verfahrens zur Dachflächenmodellierung	61
4.1	Anforderungsprofil an die Implementierung.....	61
4.1.1	Untersuchungsgebiete.....	62
4.1.2	Anforderungen an die Auswertemethode.....	62
4.1.3	Anforderungen an den Modelltyp.....	64
4.2	Spezifikation des Verfahrens.....	69
4.2.1	Zielsetzung	69
4.2.2	Umsetzung des Anforderungsprofiles.....	70
4.2.3	Datenherkunft	71
4.2.4	Übersicht des Verfahrens.....	71
4.3	Erstellung des verfahrensbezogenen Modelles	72
4.3.1	Modellauswahl und -einpassung.....	72

4.3.2	Vervollständigung der Modellparameter	78
4.4	Modellmigration	82
4.4.1	Formatkonvertierung	83
4.4.2	Niveauadaption	86
4.5	Fertigstellung des darstellungsbezogenen Modelles	87
4.5.1	Datenimport	88
4.5.2	Parametervalidierung	89
4.5.3	Konstruktion der Dachflächen	92
4.5.4	Zuweisung von Darstellungsstilen	94
4.6	Evaluierung des Dachflächenmodelles	99
4.6.1	Übersicht der Evaluierung	99
4.6.2	Untersuchungsgebiet 1	102
4.6.3	Untersuchungsgebiet 2	108
4.6.4	Untersuchungsgebiet 3	113
4.6.5	Ergebnisse der Evaluierung	114
5	Zusammenfassung	115
6	Literatur	117
	Lebenslauf	121

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Dächer als spezifischer Bestandteil eines 3D-Stadtmodelles.	6
Abb. 2: Lage und Bezeichnungen der einzelnen Körper und Flächen eines Gebäudes.....	7
Abb. 3: Bezeichnung der Dachelemente.....	8
Abb. 4: Satteldach.....	9
Abb. 5: Walmdach.....	9
Abb. 6: Zeltdach.....	9
Abb. 7: Mansarddach.....	9
Abb. 8: Mansardwalmdach.....	10
Abb. 9: Flachdach.....	10
Abb. 10: Pultdach.....	10
Abb. 11: Unterschiedliche Gaubenformen.....	11
Abb. 12: Vektorformat.....	12
Abb. 13: Rasterformat.....	12
Abb. 14: Digitale Katastralmappe.....	13
Abb. 15: Aufnahmen mit unterschiedlichen räumlichen Auflösungen.....	16
Abb. 16: Aufnahmen mit unterschiedlichen spektralen Auflösungen.....	17
Abb. 17: Aufnahmen mit unterschiedlichen radiometrischen Auflösungen.....	17
Abb. 18: DGM Datenstrukturen.....	18
Abb. 19: Luftbild und Orthophoto.....	20
Abb. 20: Perspektivische und reliefbedingte Verzerrung in Luftbildern.....	21
Abb. 21: Detailstufen der Gebäudemodelle.....	22
Abb. 22: LOD 0 – Regionalmodell.....	23
Abb. 23: LOD 1 – Klötzchenmodell.....	23
Abb. 24: LOD 2 – Detailmodell.....	24
Abb. 25: LOD 3 – Architekturmodell.....	24
Abb. 26: LOD 4 – Innenraummodell.....	25

Abb. 27: Stadtplanung.....	26
Abb. 28: 3D-Stadtmodell Salzburg.....	27
Abb. 29: Begehrbarer Athenatempel.....	27
Abb. 30: Navigationsgerät mit 3D-Ansicht	28
Abb. 31: 3D-Stadtmodell Modellierung	30
Abb. 32: 3D-Stadtmodell Analyse	30
Abb. 33: Schematischer Ablauf der Erstellung von Dachflächenmodellen.....	32
Abb. 34: Parameter der inneren und äußeren Orientierung.....	33
Abb. 35: Photogrammetrische Auswertung von Dachflächen.....	34
Abb. 36: Vegetationsdurchdringung des Laserscanners.....	36
Abb. 37: Laserscanning-Datensatz vor und nach der Filterung.....	37
Abb. 38: Unterschiedliche Varianten der Dachausmittlung.....	39
Abb. 39: Edge Event	40
Abb. 40: Split Event.....	40
Abb. 41: Kategorisierung der Vertreter des verfahrensbezogenen Modelles.....	42
Abb. 42: Probleme bei der Zuweisung von Eigenschaften in CSG-Modellen	44
Abb. 43: Darstellungsschemata des darstellungsbezogenen Modelles.....	45
Abb. 44: Kombination dreier Gebäudeprimitive zum einem Gebäudemodell	46
Abb. 45: Grobe Anpassung des Modelles mittels photogrammetrischer Auswertung.....	48
Abb. 46: Darstellung der Zuordnungshypothesen	49
Abb. 47: Gebäudemodelle, erstellt mittels eines photogrammetriebasierten Verfahrens.....	49
Abb. 48: Clusterbildung im dreidimensionalen Merkmalsraum.....	51
Abb. 49: Ablauf der Clusterbildung in getrennten, eindimensionalen Merkmalsräumen	52
Abb. 50: Verschiedene Stadien der Segmentierung koplanarer Bereiche einer Punktwolke	53
Abb. 51: Ermittlung des Grundrisses.....	54
Abb. 52: Verschnitt der Modellebenen zur Ableitung von Dachflächen.....	55
Abb. 53: Gebäudemodelle, erstellt mittels Laserscanning-Analyseverfahren.....	55
Abb. 54: Partitionierung eines verzweigten Grundrisses in einfache Formen.....	57

Abb. 55: Zusammenführung benachbarter Dachflächen mithilfe eines Regelsatzes.....	57
Abb. 56: Darstellung aller Fälle eines Laufrichtungs- und Längenvergleiches (Situation: „zwei folgende Rechts-Vertices“)	58
Abb. 57: Darstellung jener Fälle eines Laufrichtungs- und Längenvergleiches, die in mindestens einem akzeptierten Strahl resultieren (Situation: „drei folgende Rechts-Vertices“)......	59
Abb. 58: Gebäudekonstruktion, bestehend aus einfachen CSG-Primitiven	60
Abb. 59: Gebäudemodelle, erstellt mittels Dachausmittlungsalgorithmus.....	60
Abb. 60: Lage der Untersuchungsgebiete im Raum Graz.....	62
Abb. 61: Differenzierte Betrachtung variierender Traufenhöhen.....	63
Abb. 62: Kombiniertes Einsatz von Luftbild und Kataster zur Erleichterung des Auswertevorganges.....	64
Abb. 63: Prototypengeeignete und -ungeeignete Gebäudeformen im UG1.....	65
Abb. 64: Gebäudekomplexe mit eigenständigen und verschachtelten Gebädetrakten im UG1.....	66
Abb. 65: Gebäudekomplexe mit eigenständigen und verschachtelten Gebädetrakten im UG2.....	67
Abb. 66: Freistehende Gebäude unterschiedlicher Formgestaltung im UG2	68
Abb. 67: Komplexe Grundrisse und einfachen Dachformen der Gebäude im UG3.....	69
Abb. 68: Erstellung des verfahrensbezogenen Modelles der Dachlandschaft.....	73
Abb. 69: Im Verfahren zur Verfügung stehende Grundriss-/Dachform-Kombinationen	74
Abb. 70: Nicht getreue Abbildung der Realität infolge der beschränkten Möglichkeiten eines Prototypenmodelles	75
Abb. 71: Bewusste Manipulation der Abbildung zur Umgehung der Beschränktheit eines Prototypenmodelles	76
Abb. 72: Bewusste Manipulation der Abbildung zur Umgehung der Beschränktheit eines Individualmodelles	77
Abb. 73: Optionale Adaptierung der Firstlinien	78
Abb. 74: Ablauf des Analyseprozesses zur Vervollständigung der Modellparameter	82
Abb. 75: Formatkonvertierung samt Änderung des Geometrietyps	86
Abb. 76: Niveauadaption des Dachflächenmodelles	87

Abb. 77: Untersuchung potentieller F-, T-, U-, oder S-Shapes.....	90
Abb. 78: Ergebnisse verfahrensinterner Testreihen zur Beurteilung der Grundrisstyp- Analysen	91
Abb. 79: Kontrolle bestimmter geometrischer Eigenschaften innerhalb der Grundrisse	92
Abb. 80: Positionsermittlung für Firstvertices.....	92
Abb. 81: Abbildung der ausgemittelten Grundrisstypen	93
Abb. 82: Erstellung der Dachflächenprimitive	94
Abb. 83: Einsatz von Farbwert und Helligkeit zur Unterscheidung individueller Strukturen	95
Abb. 84: Verwendung von Texturen zur Ergänzung von Farbwert und Helligkeit.....	97
Abb. 85: Flexibilität durch Einsatz diskret aufgebauter Darstellungsstile aus Grundfarbe und Grauwertbild	98
Abb. 86: Virtuelle Abbildung der zu evaluierenden Untersuchungsobjekte, integriert als Teil eines 3D-Stadtmodelles.....	101
Abb. 87: Reale Abbildungen der zu evaluierenden Untersuchungsobjekte in Form von Schrägluftbildern	102
Abb. 88: Vergleich der Abbildungen von Untersuchungsobjekt 1	103
Abb. 89: Vergleich der Abbildungen von Untersuchungsobjekt 2.....	104
Abb. 90: Vergleich der Abbildungen von Untersuchungsobjekt 3.....	106
Abb. 91: Vergleich der Abbildungen von Untersuchungsobjekt 4.....	107
Abb. 92: Vergleich der Abbildungen von Untersuchungsobjekt 5.....	108
Abb. 93: Vergleich der Abbildungen von Untersuchungsobjekt 6.....	109
Abb. 94: Vergleich der Abbildungen von Untersuchungsobjekt 7.....	110
Abb. 95: Vergleich der Abbildungen von Untersuchungsobjekt 8.....	112
Abb. 96: Vergleich der Abbildungen von Untersuchungsobjekt 9.....	113

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Maßstäbe der österreichischen Katasterkarten	14
Tab. 2: Genauigkeitsklassen der österreichischen Katasterkarten.....	14
Tab. 3: Genauigkeitsklassen des österreichischen DGM.....	19
Tab. 4: Im Verfahren erlaubte Kombinationen aus Grundriss und Dachform	73
Tab. 5: Vorselektion potentieller Features mit vordefinierter Grundrisstypen.....	89
Tab. 6: Katalog der Firstvertices.....	93
Tab. 7: Beschränkungen und Auswirkungen einfacher Lösungsansätze zur Dachflächenmodellierung.....	114

Kurzfassung

Heutzutage herrscht von Seiten verschiedener Nutzergruppen eine große Nachfrage an raumbezogenen Daten, im speziellen gilt dies für dicht besiedelte Räume. Die Datenlieferanten sind dabei, abhängig von der Art des urbanen geographischen Phänomens, mit unterschiedlich komplexen Vorgängen der Datenerstellung konfrontiert. Als besonders aufwändig gelten in dieser Hinsicht Methoden zur Abbildung von Gebäuden, genauer deren Dachflächen. Dabei gilt, je akkurater das Modell der Dachlandschaft ausfallen soll, umso größer müssen die bereitgestellten Ressourcen für den Erzeugungsprozess ausfallen. Die vorliegende Arbeit nimmt sich der Erstellung von Dachflächen für Gebäude eines 3D-Stadtmodelles an und beantwortet die Frage wo die Grenzen der Modellierung von Dachlandschaften, bei Einsatz minimaler Mittel zu ziehen sind. Im Theorieteil werden dazu alle wichtigen Grundlagen und die einzelnen Arbeitsschritte der Erstellung erläutert, darauf aufbauend erfolgt eine Vorstellung unterschiedlicher Verfahren der Dachflächenmodellierung. Abschließend werden für ausgewählte Untersuchungsgebiete die, an Erstellungsverfahren gerichteten, Mindestanforderungen aufgestellt. Im praktischen Teil erfolgt eine Umsetzung dieses Anforderungsprofils in Form eines eigenen Verfahrens, mit dem anschließend auch ein Dachflächenmodell der Untersuchungsgebiete erzeugt wird. Die Gegenüberstellung der modellierten Dachlandschaft mit Schrägluftbildern der entsprechenden Gebiete bestätigt die aus der Theorie bekannten Mängel, zeigt aber auch bisher noch unadressierte Beschränkungen auf.

1 Einleitung

Seit im Zuge der Entwicklung der Informationstechnologie die, für die Erstellung und Nutzung, notwendigen technischen Voraussetzungen geschaffen wurden, entstehen aus dem Kreis der Nutzer von Daten mit Raumbezug mehr und mehr Anforderungen zur Erfassung, Visualisierung und Analyse von dreidimensionalen Geodaten. Besonders für dicht besiedelte Räume werden von den Behörden, der Wirtschaft oder sonstigen Institutionen entsprechende räumliche Informationen benötigt [GRÖ-04], wie auch folgendes Zitat beweist:

„Das dreidimensionale Stadtmodell von Wien ist Basis für die Bewältigung neuer Herausforderungen der modernen Stadtplanung. Vor allem für die Simulation geplanter Bauvorhaben und Flächenwidmungen sowie für die Berechnung von Sichtbarkeiten, Abschattungen, Lärm- und Schadstoffausbreitungsmodellen werden dreidimensionale Stadtmodelle benötigt.“ [SVW-09]

Aus diesem Zitat lassen sich zwei Kernaussagen extrahieren:

- Das komplexe System einer urbanen Region verlangt nach Vorausplanung um einen geregelten Ablauf zu gewährleisten
- Planung verlangt nach entsprechender Information. Je umfassender diese zur Verfügung steht, umso gezielter können daraus Erkenntnisse abgeleitet werden.

Es kann also behauptet werden, dass der Bedarf nach einem räumlichen Informationssystem für den urbanen Raum besteht. Dieses Erfordernis kann in Form eines 3D-Stadtmodells bedient werden, welches sich i.A. durch folgende Inhalte auszeichnet:

„Innerhalb eines 3D-Stadtmodells stellen Gebäude neben dem Verkehrsnetz und der Vegetation die zentrale Objektgruppe dar.“ [STE-00]

Im Blickpunkt dieser Arbeit soll ein zentraler Bestandteil der Objektgruppe der Gebäude stehen, die Dächer. Die Auseinandersetzung mit anderen Objektgruppen des 3D-Stadtmodells ist nicht nur in wissenschaftlichen Arbeiten etwas vernachlässigt wie Jansa, Stanek [JAN-03] anmerken, auch folgendes praktisches Beispiel zeigt die Dominanz der Gebäude:

„Das dreidimensionale Stadtmodell von Wien besteht in seiner derzeitigen Ausprägung aus folgenden Komponenten: Digitales Geländemodell, Flächen-Mehrzweckkarte, Baukörpermodell, Dachmodell. Das Dachmodell ist ein wichtiger Bestandteil des dreidimensionalen Stadtmodells von Wien. Für Schattensimulationen beziehungsweise Sichtbarkeitsanalysen ist die korrekte Darstellung der Dachlandschaft ein wichtiger Faktor, um ein realitätsnahes Ergebnis zu erhalten.“ [SVW-09]

Die Nutzung, sprich die Ausführung derartiger Simulationen bedingt natürlich die Verfügbarkeit eines (möglichst aktuellen) Datenbestandes modellierter Dachabbildungen.

Die explizite Erwähnung dieser Prämisse mag auf den ersten Blick verwundern, doch wie sich beispielhaft am Wiener Beispiel zeigt kann meist nur von einem punktuellen Vorhandensein solcher Dachmodelle ausgegangen werden [STÄ-04]:

„Das Dachmodell wird nicht flächendeckend für das gesamte Stadtgebiet, sondern nach Bedarf [...] gebiets- und projektbezogen erzeugt [...] Mithilfe der Luftbilddauswertung werden zusätzlich Dachlinien (Traufe, Dachbruchkante, allgemeine Dachlinie) und Dachkoten (Flachdach, Gesims, Giebel) kodiert gemessen. In einem eigenen Arbeitsschritt erfolgt dann die Dachmodellierung.“ [SVW-09]

Diese Situation ist auf den enormen Arbeitsaufwand zurückzuführen, der zur Abbildung von Dachlandschaften notwendig ist. Je höher dabei der angestrebte Detaillierungsgrad, der sogenannte Level of Detail (vgl. Kap. 2.4: S. 21), eines Modelles liegt, umso elaborierter muss das Erzeugungsverfahren ausfallen und desto zeitintensiver ist letztendlich die Erstellungsphase. Diese kann natürlich durch, verglichen mit elaborierten, einfacheren Ansätzen der Dachmodellierung verkürzt werden. Zum Einsatz kommen dabei weniger mächtigere Erzeugungsverfahren, denen es zwar an hohen, umsetzbaren Detaillierungsgraden mangelt, deren Vorzüge jedoch in einer zeitsparenden Entwicklung und Anwendung liegen. Durch Nutzung bestehender, generischer Werkzeuge für möglichst viele Arbeitsschritte und einfacheren Abbildungsmethoden lässt sich eine zeitsparendere Modellerstellung erreichen.

Um also trotz begrenzter Ressourcen der Modellerstellung einer unzulänglichen Abdeckung des Gebietes begegnen zu können bietet sich eine differenzierte Modellierung der Dächer in Form variierender Detailstufen an [STÄ-04]:

- Ausgewählte Bereiche von besonderem Interesse können somit vom Einsatz aufwändiger Verfahren, d.h. hoher resultierender Detaillierungsgrade profitieren.
- Die restlichen Gebiete sollen hingegen von simpleren Verfahren mit weniger detaillierten Dachmodellen möglichst flächendeckend „aufgefüllt“ werden.

Um zur adäquaten Abbildung der Dachlandschaften eine möglichst ressourceneffiziente Modellierungsstrategie anwenden zu können ist deshalb die genaue Kenntnis der Grenzen solcher einfacher Verfahren der Dachmodellierung von Interesse. Dieses Bedürfnis soll im Zuge der Arbeit aufgegriffen und als Forschungsfrage untersucht werden.

1.1 Forschungsfrage

Zur differenzierten Betrachtung jener Beschränkungen, denen einfache Verfahren der Dachmodellierung – im Gegensatz zu elaborierten Vertretern – unterliegen, sollen folgende Punkte näher beleuchtet werden:

- a. Welche Mindestanforderungen sind an ein Verfahren zu stellen, damit sich eine Abbildung der Dachlandschaft im Bereich von Level of Detail 1 bis 2 erreichen lässt?

- b. Lassen sich alle diese Anforderungen mittels eines einfachen Verfahrens implementieren und welches Modell einer Dachlandschaft kann damit erstellt werden?
- c. Können infolge einer Gegenüberstellung von Modell und Realität die theoretischen Anforderungen in der Praxis bestätigen werden? Stellt sich also eine adäquate Abbildung der Dachlandschaft ein, oder zeigen sich möglicherweise weitere Grenzen der Abbildbarkeit der Realität?

1.2 Arbeitsübersicht

Der Kernabschnitt dieser Arbeit kann in vier, aufeinander aufbauende Kapitel eingeteilt werden, die sich anfangs sukzessive der Vermittlung des notwendigen Wissens zur Erstellung von Dachmodellen widmen. Darauf aufbauend soll die Arbeit im vorletzten Kapitel, in der Beantwortung der Forschungsfrage, gipfeln, wobei Punkt a. anhand der bisher vermittelten theoretischen Grundlagen und die Punkte b. und c. anhand einer praktischen Umsetzung beantwortet werden sollen:

- Kapitel 2 soll an das Thema dieser Arbeit herantreten. Definitionen und Erläuterungen dienen dazu den Bogen vom 3D-Stadtmodell hin zum Dach zu spannen, um somit einen Bezug zwischen diesen beiden Begriffen herzustellen. Weitere Themen, wie die zur Modellerstellung nutzbaren Datengrundlagen, modellkategorisierende Detaillierungsgrade und Anwendungsbereiche von Dachmodellen komplettieren das Kapitel, bilden zugleich aber auch die Basis für darauf aufbauende Themen in folgenden Kapiteln.
- Kapitel 3 widmet sich dem Vorgang der Erstellung von Dachmodellen. Dabei werden federführende Prozesse aufgedeckt und infolge einer näheren Betrachtung unterzogen. Aufbauend auf bereits vermittelte Erkenntnisse zu Datengrundlagen werden Methoden zur dachspezifischen Datenauswertung beschrieben und deren Vor- und Nachteile angeführt. Welche Modelltypen sich zur Abbildung von Dächern anbieten und wie sich die unstrukturierten Resultate einer Dachauswertung in diese überführen lassen wird abschließend ausführlich anhand von Verfahren zur Erstellung von Dachmodellen vermittelt.
- Kapitel 4 nimmt sich der Forschungsfrage dieser Arbeit an. Aus einem, eigens für diesen Anwendungszweck entwickelten Verfahren soll ein Modell ausgewählter Dachlandschaften hervorgehen. Ein anschließender Vergleich der Modellabbildung mit Schrägluftbildern soll etwaige Mängel im Dachmodell entlarven und somit die „Grenzen einfacher Lösungsansätze der Dachflächenmodellierung“ aufdecken.
- Kapitel 5 soll eine Zusammenfassung der Ergebnisse dieser Arbeit bieten.

2 Grundlagen der 3D-Dachmodellierung

Die im Zentrum dieser Arbeit stehenden Dächer, bzw. deren Modelle müssen als spezifischer Bestandteil eines umfassenderen Modelles verstanden werden, dem einer Stadt. In diesem Kapitel soll diesem Umstand mittels Definitionen und Erläuterungen Rechnung getragen werden, sodass sich ein Bezug zwischen Dach- und Stadtmodell herstellen lässt. Weitere Themen sind die zur Modellerstellung nutzbaren Datengrundlagen, modellkategorisierende Detaillierungsgrade und die Anwendungsbereiche von Dachmodellen. Diese grundlegenden Inhalte bilden die Basis für fortgeschrittene Themen in folgenden Kapiteln.

2.1 3D-Stadtmodelle

3D-Stadtmodelle sind bereits einige Zeit Gegenstand der Forschung und Grundlage für unterschiedliche Anwendungen, die sich in die Bereiche Visualisierung und Analyse gliedern lassen. In den frühen 1960er Jahren des 20. Jahrhunderts entstanden die ersten Entwicklungen im Bereich Virtual Reality mit von im weitesten Sinne Szenen von 3D-Stadtmodellen. Koppers beschreibt zwei Installationen, die sogenannte virtuelle Spaziergänge (vgl. Kap. 2.5.1: S. 25) durch New York (Sensorama, 1962) und Aspen (Aspen Movie Map, 1978) ermöglichten. Den Benutzern wurden dabei in multimedial simulierten Stadtfahrten glaubwürdige, dreidimensionale Eindrücke der erwähnten Gebiete geboten [KOP-02].

Die Fortschritte in der Computertechnik revolutionierten Anfang der 1990er Jahre den gesamten Bereich der Visualisierung durch Einsatz computergenerierter Animationen, welche sie auch hervorragend zur Darstellung urbaner Räume eigneten. (Digitale) 3D-Stadtmodelle boten unzählige Vorteile, von der Wahl beliebiger Perspektiven bis hin zur vollkommenen Bewegungsfreiheit im virtuellen Raum [STÄ-04]. Diese Vorzüge machten sich auch andere Bereiche der Wissenschaft zu Nutze um Analysen innerhalb des städtischen Raumes unter frei definierbaren Testbedingungen in einer zuvor nicht möglichen Komplexität durchzuführen.

Bis heute fehlt es zwar mangels konkreter Auftraggeber an einer flächendeckenden Verfügbarkeit von 3D-Stadtmodellen, es gibt jedoch viele diffuse Interessen, welche punktuell verfügbare 3D-Stadtmodelle hervorgebracht haben [STÄ-04]. Laut Albert et al. [ALB-03] steigt in der Zukunft der Bedarf an Modellen für Visualisierungen und räumliche Analysen im urbanen Bereich. Planungen in diesen Umgebungen bedürfen einer immer umfassenderen Kenntnis der aktuellen räumlichen Gegebenheiten und Eigenschaften um effektive Beurteilungen, Simulationen oder Optimierungen treffen zu können [STE-00].

2.1.1 Definition

Damit eine umfassende Definition der 3D-Stadtmodelle überhaupt erfolgen kann ist zuerst die Bedeutung des gemeingültigeren Ausdruckes Modell zu erläutern:

„Modelle [...] sind Arbeitsmittel der Wissenschaft. Durch Ansatz mathematischer Beziehungen, graphischer Darstellungen [...] usw. nähern sie sich entsprechend dem jeweiligen Erkenntnisstand mehr oder weniger gut der Wirklichkeit oder Teilen davon. Die damit eintretende Ordnung und Reduktion der Information ist in ihrem Wesen nach eine Verallgemeinerung [...] aber erst auf diesem Wege gelingt es, die Fülle der Umweltinformation zu verarbeiten [...].“ [HAK-02]

Durch die Einführung des Modellbegriffs ist möglich den beiden zuvor erwähnten Anwendungsbereichen Visualisierung und Analyse durch folgende Definitionen eines 3D-Stadtmodelles Rechnung getragen:

„Unter einem digitalen 3D-Stadtmodell ist ein dreidimensionales Computermode einer Stadt zu verstehen. In diesem Modell sollen die realen Objekte der Stadt möglichst realitätsnah abgebildet werden. Zu jedem Objekt werden die Informationen gespeichert, die für eine räumliche Rekonstruktion erforderlich sind.“ [LOR-96]

„3D-Stadtmodelle sind als raumbezogene Informationssysteme zu verstehen, in denen räumliche sowie inhaltliche Zusammenhänge der modellierten urbanen Räume erfasst, verwaltet und verarbeitet werden.“ [FÖR-93]

2.1.2 Inhalte

Abhängig vom vorgesehenen Anwendungsbereich (vgl. Kap. 2.5: S. 25) bzw. dem gewählten Detaillierungsgrad (vgl. Kap. 2.3: S. 11) kann ein 3D-Stadtmodell folgende Objektgruppen enthalten [STÄ-04]:

- Beschreibung der Geländeform (Geländemodell)
- Gebäude einschließlich wesentlicher Dachaufbauten sowie unterirdische Bauwerke (Gebäudemodelle)
- Texturen der Geländeoberfläche (Orthophotos, Karten) und der Gebäudeaußenflächen (Photos, Graphiken)
- sonstige Elemente: Brücken, Infrastruktur, Vegetation, Straßenmöblierung, Einrichtungen zur Verkehrsregelung

Als zentrale Objektgruppen werden von Jansa, Stanek [JAN-03] sowie Steinhage [STE-00] diese Komponenten aufgelistet: Gebäude, Verkehrsnetz und Vegetation.

Unabhängig davon, welche Objektgruppen nun einem 3D-Stadtmodell zugezählt werden, sind für das Thema dieser Arbeit nur die Gebäude von Interesse, da Dächer

Gebäudebestandteile sind. Folgende Definition und Skizze (vgl. Abb. 1: S.6) sollen dies untermauern:

„Gebäude: ein oberirdisches Bauwerk mit einem Dach und wenigstens zwei Wänden, welches von Menschen betreten werden kann und dazu bestimmt ist [...] zu schützen.“
[BAU-96]

„Das Dach ist der obere Abschluss eines Gebäudes. Zusammen mit den Wänden trennt es Außenraum von Innenraum und schützt vor der Witterung. Seine Gestaltung ist prägend für das gesamte Bauwerk und abhängig von klimatischen Bedingungen, Baustoffen und Baustilen. Im Verlauf der Architekturgeschichte entwickelten sich unterschiedlichste Dachformen.“ [WIK-09c]

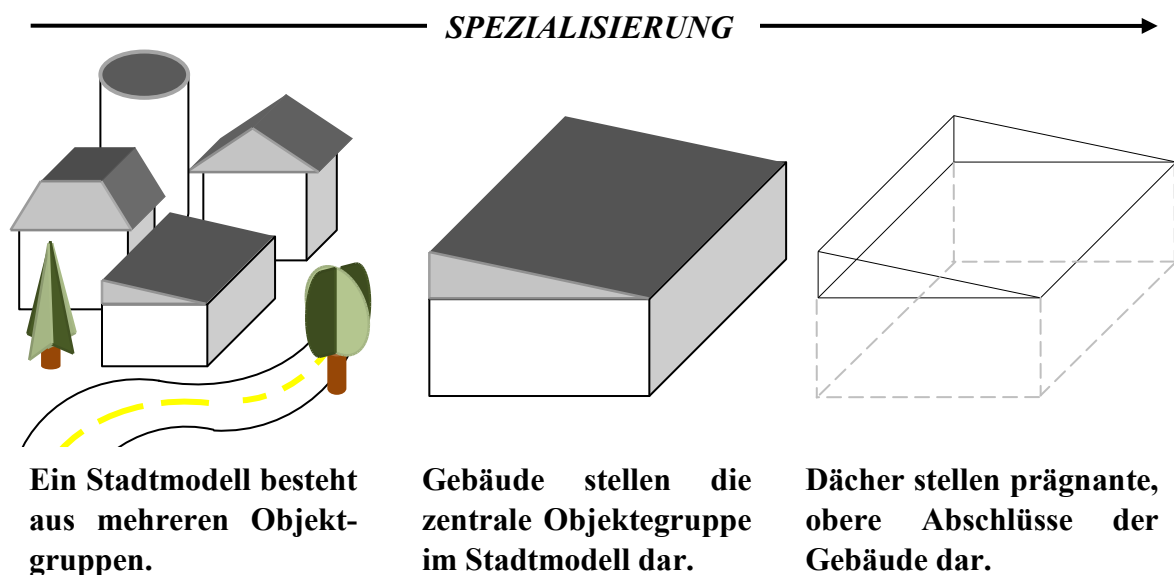


Abb. 1: Dächer als spezifischer Bestandteil eines 3D-Stadtmodelles.

2.2 Dachflächen

2.2.1 Definition

So wie Dächer eines von mehreren Bestandteilen eines Gebäudes darstellen (Abb. 2: S. 7), so lässt sich auch ein Dach selbst in mehrere Teile unterscheiden. Als dabei am bedeutungsvollsten gelten die Dachflächen, welche nun anhand folgender Definition konkretisiert werden:

„Als Dachfläche wird die Summe aller Flächen eines Daches bezeichnet. Diese Flächen können eben oder konvex bzw. konkav gekrümmt sein. Festgelegt werden sie durch die

Dachform (vgl. Kap. 2.2.3: S. 8). Je komplizierter der Dachaufbau, desto komplizierter sind auch die Dachflächen [...].“ [BAU-09]

Es handelt sich bei Dachflächen also um jene Teile eines Gebäudes, die sich einem (fiktiven) Beobachter bei orthogonaler Parallelprojektion offenbaren. Als einzige Voraussetzung gilt dabei, dass das Gebäude lotrecht orientierte Wandflächen aufzuweisen hat.

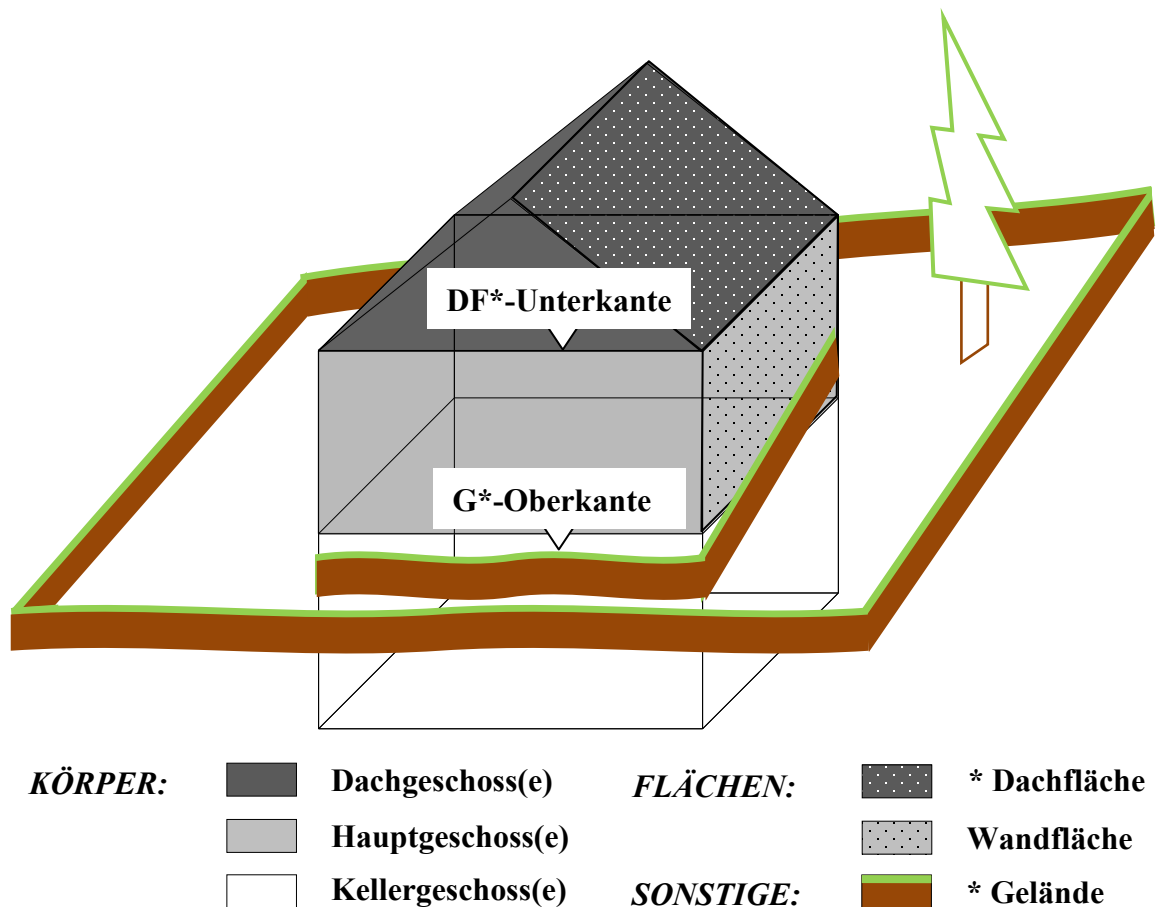


Abb. 2: Lage und Bezeichnungen der einzelnen Körper und Flächen eines Gebäudes

Im Verlauf dieser Arbeit ergibt sich die Notwendigkeit abseits des Daches auf einen weiteren Gebäudebestandteil Bezug zu nehmen, der sich von Dachfläche-Unterkante (DF-UK) bis Gelände-Oberkante (G-OK) erstreckt. Dazu muss allerdings zuerst der Begriff des Geschoßes eingeführt werden:

„Geschoß: die Gesamtheit der in einer Ebene liegenden Räume eines Gebäudes [...].“ [BAU-96]

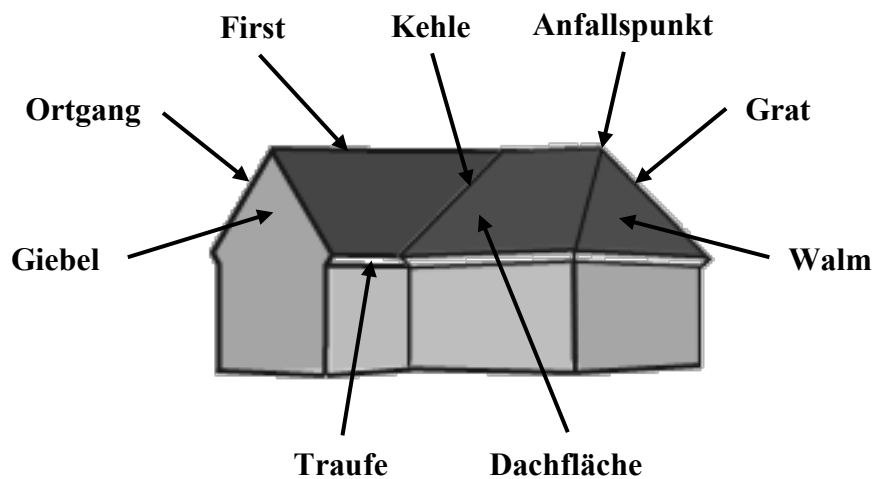
Im Gegensatz zu den Dach- und Wandflächen handelt es sich bei Geschoßen um Volumenkörper, die es ermöglichen ein Gebäude in (vertikale) räumliche Abschnitte zu teilen. Abhängig vom Niveau (unter-, oberirdisch bzw. Dach) werden sie als Keller-, Haupt- oder Dachgeschoß bezeichnet.

Der gesuchte Gebäudebestandteil lässt sich somit durch eine einfache Subtraktion ausdrücken und wird im Folgenden als Gebäudetorso bezeichnet:

$$\text{Gebäudetorso} = \text{Gebäudevolumen}^* - \text{Summe der Dachgeschoße} \quad (1)$$

* oberhalb von G-OK.

2.2.2 Dachelemente



Quelle: ergänzt nach [IMM-09]

Abb. 3: Bezeichnung der Dachelemente

Zu den weiteren Teilen eines Daches gehören neben den Dachflächen jene linienhaften Elemente, welche als Dachkanten die Begrenzungs- oder Schnittlinien der Dachflächen bilden (vgl. Abb. 3: S. 8). Jene in horizontaler Lage werden in First (obere Dachkante) und Traufe (untere Dachkante) unterschieden. Begrenzen vertikale Dachkanten eine Wandfläche, so nennt man diese Fläche Giebel. Die Dachkanten werden in Folge als Ortgang bezeichnet, und verbinden Traufe mit First. Befindet sich anstelle des Giebels hingegen eine schrägliegende Dachfläche, so spricht man von einem Walm, die begrenzenden Dachkanten heißen in diesem Fall Grat. Der Punkt, an dem sich die drei Dachflächen treffen, wird Anfallspunkt genannt [WIK-09c].

2.2.3 Dachformen

Wie bereits erläutert wurde ist für die Ausprägung der Dachflächen die Dachform des Gebäudes ausschlaggebend. Diese kann in vielfältiger Art und Weise auftreten, folgend werden nun die gängigsten Vertreter nicht gekrümmter Dachflächen angeführt.

Satteldach

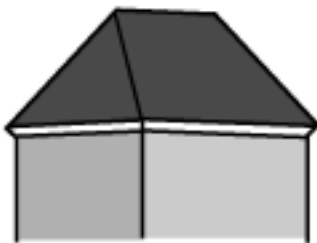


Quelle: in [IMM-09]

Abb. 4: Satteldach

Das Satteldach ist aufgrund seiner Einfachheit die am weitesten verbreitete Dachform. Es ist durch zwei gegeneinander geneigte Dachflächen gekennzeichnet, die sich am First schneiden, welcher entlang der längeren Gebäudeseiten verläuft. An den kürzen Seiten befinden sich die Giebel (vgl. Abb. 4: S. 9), welche das Dach abschließen. Dachneigungen bzw. Traufhöhen können sowohl identisch als auch unterschiedlich sein [HAA-06].

Walmdach

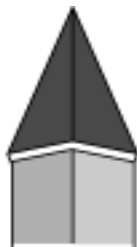


Quelle: in [IMM-09]

Abb. 5: Walmdach

Das Walmdach unterscheidet sich vom Satteldach durch das Fehlen des markanten Giebels, welcher durch den Walm ersetzt wird (vgl. Abb. 5: S. 9). An jeder Gebäudeseite befinden sich somit geneigte Dachflächen, welche an den Graten oder am First ihre Schnittkanten bilden. Die Hauptdachflächen entlang der längeren Gebäudeseiten nehmen die Form eines Trapezes an, die Walmdachflächen weisen eine Dreiecksform auf [HAA-06], [IMM-09].

Zeltdach



Quelle: in [IMM-09]

Abb. 6: Zeltdach

Eine Spezialform des Walmdaches stellt das Zeltdach dar, alle gegeneinander geneigten Dachflächen treffen sich hier in einem Anfallspunkt (vgl. Abb. 6: S. 9), der Dachfirst entfällt somit [HAA-06]. Zeltdächer sind häufig auf Türmen (z.B. Kirchtürme) oder auf Erkern zu finden [KOP-02].

Mansarddach



Quelle: in [IMM-09]

Abb. 7: Mansarddach

Die Dachflächen beim Mansarddach sind ein- oder mehrfach geknickt. Daraus entstehen Bereiche mit unterschiedlicher Neigung, wobei die unteren Dachflächen steiler sind als die oberen (vgl. Abb. 7: S. 9). Diese Konstruktion vergrößert den zur Verfügung stehenden Innenraum und erlaubt dessen bessere Nutzung [IMM-09].

Mansardwalmdach

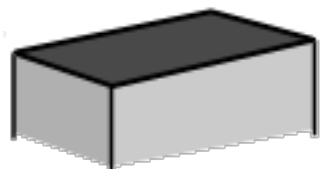


Quelle: in [IMM-09]

Abb. 8: Mansardwalmdach

Hierbei handelt es sich um eine Mischform aus Mansard- und Walmdach bei der neben den Hauptdachflächen auch die Walme (vgl. Abb. 8: S. 10) jeweils zwei Neigungen aufweisen [HAA-06].

Flachdach



Quelle: ergänzt nach [IMM-09]

Abb. 9: Flachdach

Dächer, die aus einer einzigen Dachfläche (vgl. Abb. 9: S. 10) bestehen und eine Neigung von 2 – 20 Grad nicht überschreiten, bezeichnet man als Flachdächer [IMM-09]. Das geringe Gefälle dient als Schutz vor eindringendem Wasser und ist behördlich vorgeschrieben [BAU-09].

Pulldach



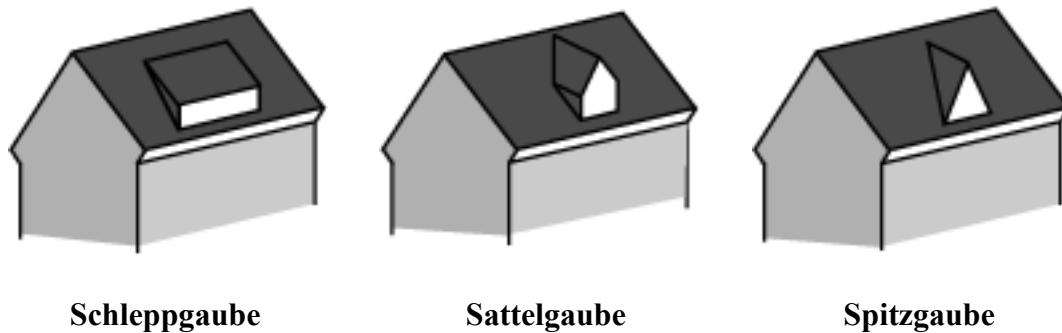
Quelle: in [IMM-09]

Abb. 10: Pulldach

Ein Pultdach besitzt genauso wie das Flachdach nur eine Dachfläche, allerdings mit einer Neigung größer 20 Grad. Die waagrechte obere Dachkante bildet den First, die untere die Traufe, welche bei dieser Dachform einzeln auftritt (vgl. Abb. 10: S. 10). Zu beiden Seiten befinden sich die vertikalen Orgänge. Die Wand am First wird die Hohe Wand genannt [WIK-09h].

2.2.4 Gauben

Unterbrechungen oder Durchdringungen der Dachflächen treten als Durchlässe für Schornsteine oder in Form von Dachfenstern bzw. Dachgauben auf [WIK-09c]. Bei Gauben handelt es sich um Dachaufbauten, die aus dem Dach herausragen (vgl. Abb. 11: S. 11) und eine eigenständige Dachform besitzen [KOP-02]. Ursprünglich dienten Gauben kleinerer Ausführung nur der Dachbelüftung, erst mit der wohnlichen Nutzung von Dachräumen begannen Gauben in unterschiedlicher Ausprägung, angelehnt an die unterschiedlichen Dachformen, aufzutreten [IMM-09].



Quelle: in [IMM-09]

Abb. 11: Unterschiedliche Gaubenformen

2.3 Datengrundlagen

Topographische und sachbezogene Angaben über Gebäude werden flächendeckend von den dafür zuständigen Einrichtungen wie z.B. dem amtlichen Vermessungswesen vorgehalten, wobei es sich jedoch ausschließlich um die Grundrisse der Gebäude (vgl. Kap. 2.3.2: S. 13) handelt. Informationen über Gebäudeausprägungen wie Dachflächen sind praktisch nicht vorhanden [STÄ-04], werden sie benötigt, müssen sie erst gebäudeweise erhoben werden. Im Idealfall kann für diese Auswertung (vgl. Kap. 3.2: S. 32) auf bereits flächendeckend vorliegende Datengrundlagen zurückgegriffen werden.

Als Datengrundlagen werden in dieser Arbeit jene Geographischen Daten (Geodaten) (vgl. Kap. 2.3.1: S. 11) bezeichnet, welche eine Ableitung von Dächern erlauben und möglichst flächendeckend vorliegen.

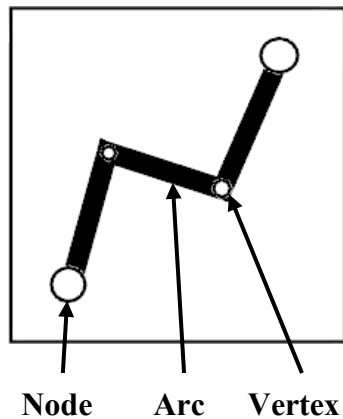
2.3.1 Einleitung

Geodaten werden in einem Geographischen Informationssystem (GIS) objektbezogen vorgehalten und teilen sich in Geobasisdaten (raumbeschreibende, topographische Daten) und Geofachdaten (sachbezogene Informationen, auch anderer Fachdisziplinen). Die Speicherung und Datenverarbeitung von Geodaten bedarf zuvor einer Aufbereitung von Sachverhalten der realen Welt und geschieht in Form von mathematischen Formulierungen, Zuordnung zu Datenstrukturen, logischen Ausdrücken und weiteren Kriterien [GIL-09]. Riedl beschreibt den dazu notwendigen Prozess folgendermaßen:

Phänomene der realen Welt werden durch Features (geometrische Primitiva), dazugehörigen Attributen und graphischen Beschreibungen für bestimmte Sachverhalte abgebildet. Diese Abbildungen sind im Vergleich zu ihren realen Ebenbildern, dem Anwendungszweck entsprechend, vereinfacht modelliert. Die Lage der geometrischen Primitiva im Raum muss in einem einheitlichen Bezugssystem festgelegt sein. Geodaten bilden somit die Datenbasis in einem Geographischen Informationssystem [RIE-08].

Geometrische Primitiva liegen in zwei unterschiedlichen Formaten vor, Vektor- und Rasterformat.

Vektorformat



Quelle: in [RIE-08]

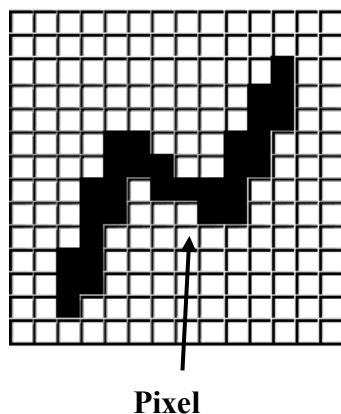
Abb. 12: Vektorformat

Die Geometrie eines Vektorobjekts wird gebildet durch die explizite Koordinatenangabe zu jedem Node bzw. Vertex. Je nach gewählter Primitiveform entsteht, formgebend durch die Nodes bzw. Vertices (vgl. Abb. 12: S. 12), ein null- (Point), ein- (Line/Arc), zwei- (Polygon) oder dreidimensionales (Polyeder) Primitive, welches das Objekt graphisch repräsentiert.

Folgende Eigenschaften zeichnen das Vektorformat aus:

- geeignet für diskrete Phänomene
- hohe Erfassungszeit
- logische Strukturierung und Objektbezug einfach zu realisieren
- komplexe Datenstruktur

Rasterformat



Quelle: in [RIE-08]

Abb. 13: Rasterformat

Bei Rasterdaten entfällt die koordinatenweise Angabe der Objekte, die Geometrie bzw. Form ergibt sich implizit aus der Anordnung der Grauwerte im zweidimensionalen Pixel- (vgl. Abb. 13: S. 12) bzw. dem dreidimensionalen Voxel-Raster. Allerdings entfällt auch die Möglichkeit die Objektzugehörigkeit der Pixel festzustellen, Netzwerkanalysen können somit nicht durchgeführt werden.

Folgende Eigenschaften zeichnen das Rasterformat aus:

- geeignet für kontinuierliche Phänomene
- niedrige Erfassungszeit
- logische Strukturierung und Objektbezug fast nicht zu realisieren
- einfache Datenstruktur

Unter einem Kataster versteht man die systematische Erfassung und Aufstellung gleichartiger Gegenstände, in diesem Fall die flächendeckende Beschreibung sämtlicher Parzellen (Grundstücke) eines Landes durch räumliche und attributive Daten. Das Wort Kataster stammt aus dem Griechischen und bedeutet Liste, Register bzw. Geschäftsbuch [WIK-09f]. Die Bezeichnung Kataster ist länderspezifisch, zu finden sind u.a. auch die Begriffe Katastralmappen (Österreich), Flurkarten (Süddeutschland) oder Grundbuchpläne (Schweiz).

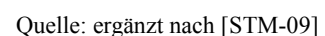


Abb. 14: Digitale Katastralmappe

In Österreich entwickelte sich der ursprünglich 1817, zur gleichmäßigen Berechnung der Grundsteuer, angelegte Grundsteuernkataster hin zum Grenzkataster. Dieser erfüllt den Zweck des verbindlichen Nachweises von Grundstücksgrenzen, der Verortung von Benutzungsarten und sonstiger Angaben zur leichteren Kenntlichmachung der Grundstücke. Er dient darüber hinaus als Planungsgrundlage für verschiedenste Anwendungsgebiete. Aufgrund der Wichtigkeit dieser Aufgaben ist die Organisation und Weiterentwicklung per Vermessungsgesetz geregelt und wird durch das Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV) durchgeführt. Folgendes Beispiel zeigt die wesentlichen Informationsebenen der (digitalen) Katastralmappe, wobei der Ebene Gebäude in dieser Arbeit besonderes Interesse gilt.

	Ortskerne	Ländliche Gebiete	Ödland
Vormetrische Maßstäbe	1:1440	1:2880 *	1:5760
Metrische Maßstäbe	1:1000	1:2000 *	

* Grundmaßstab

Quelle: in [RIE-08]

Tab. 1: Maßstäbe der österreichischen Katasterkarten

Katasterkarten sind besonders großmaßstäbige Kartenwerke (vgl. Tab. 1: S. 14), da in kleineren Maßstäben die Hauptelemente der Katasterkarten (vgl. Abb. 14: S. 13) nicht realisierbar wären. Die Lagegenauigkeiten reichen vom cm- bis in den m-Bereich (vgl. Tab. 2: S. 14), bedingt durch die lange Tradition des Katasters und der unterschiedlichen Aufnahmemethoden wie terrestrischer Vermessung oder Photogrammetrie (vgl. Kap. 3.2.1: S. 32).

Genauigkeitsklasse	Beschreibung	Grundstücke (10 Mio. = 100 %)
Klasse 1 – Grundsteuernkataster	Lagegenauigkeit: dm- bis m-Bereich Sekundäre Datenaufnahme, wurde von der analogen Katastralmappe vektorisiert. Keine koordinative Festhaltung von Grenzpunkten.	60 %
Klasse 2 – Grundsteuernkataster	Lagegenauigkeit: cm- bis dm-Bereich Wie Klasse 1, es erfolgte aber eine koordinative Festhaltung von Grenzpunkten.	30 %
Klasse 3 – Grenzkataster	Lagegenauigkeit: cm-Bereich Primäre Datenaufnahme, Rekonstruktion von Grenzpunkten in Natur möglich, da eine Vermessung erfolgte.	10 %

Quelle: in [BEV-09], [RIE-08]

Tab. 2: Genauigkeitsklassen der österreichischen Katasterkarten

Die Ausführung erfolgte ursprünglich in handgezeichneter Form, in Österreich wurde 1987 mit dem Aufbau der Digitalen Katastralmappe (DKM) begonnen. Durch Vektorisierung der bestehenden Kartenwerke geschah der Sprung ins digitale Zeitalter, wodurch sich folgende Vorteile ergaben:

- Die Darbietung der Information erfolgt weitgehend unabhängig von Maßstab und Blattschnitt
- Freie Wahl der Ausgabeform (analog, digital)

Neben den räumlichen Daten (Grundsteuer- bzw. Grenzkataster) beinhaltet der Kataster noch attributive Daten in Form des Grundstücksverzeichnisses [RIE-08]:

- Grundstücksdaten (Fläche, Nutzung,...)
- Eigentümerdaten
- Grundstücksadressen
- Anmerkungen
- Administrative und statistische Angaben

2.3.3 Luft-/Satellitenbilder

Thema dieses Kapitels sind jene Produkte, welche mit passiven Verfahren der Fernerkundung aus dem für Menschen sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums plus dem angrenzenden nahen Infrarotbereich gewonnen werden.

Unter Fernerkundung versteht man die Datengewinnung durch Empfangseinrichtungen, die sich in einiger Entfernung zur Erdoberfläche (dem Ort der Messung) befinden, so z.B. in Luft- oder Raumfahrzeugen. Während der Datenaufnahme wird die natürliche Strahlung, die von der Oberfläche reflektiert oder ausgesendet wird (Sonnenlicht, Thermalstrahlung), durch einen Sensor empfangen und zu Bilddaten umgesetzt. Wenn hierbei nicht mittels künstlicher Strahlungsquellen auf die zu beobachtenden Objekte eingewirkt wird, spricht man von passiven Fernerkundungssystemen [RIE-08]. Als Beispiel der aktiven Fernerkundung sei Laserscanning erwähnt (vgl. Kap. 3.2.2: S. 35).

Luftbilder

Luftbilder entstehen durch Befliegung von Bildflugzeugen, die mit Vorrichtungen für photographische Erfassungen ausgestattet sind. Die Durchführung bedarf einer genauen Planung im Voraus und erfolgt zu gewissen Jahres- (Frühjahr, kein Laub) bzw. Tageszeiten (Mittagszeit, Schatten), damit möglichst optimale Aufnahmebedingungen vorherrschen. Die Flughöhen liegen zwischen 300 und 7500 m, wobei das aufzunehmende Gebiet meist in parallele Flugstreifen eingeteilt und in O/W- oder N/S-Richtung beflogen wird. Benachbarte Bilder sollen eine Längsüberdeckung von mindestens 60 % und eine Querüberdeckung von 20 bis 30 % aufweisen, damit ist sichergestellt, dass jeder Gelände- oder Objektpunkt, z.B. von Dachflächen (vgl. Kap. 2.2: S. 6) in mindestens zwei Luftbildern abgebildet ist, wodurch in Folge photogrammetrische Auswertungen (vgl. Kap. 3.2.1: S. 32) möglich werden. Die Luftbildaufnahmen entstehen meist in Form von Senkrechtaufnahmen durch eine im Flugzeug installierte Reihenmesskammer. Mit dieser ist eine systematische Aufnahme von Bildreihen möglich, wobei je nach Auswertezweck

Filme mit panchromatischer oder infraroter Sensibilisierung sowie Farbfilme zum Einsatz kommen. Das Bildformat beträgt vorwiegend 23 mal 23 cm², als Kammerkonstante kommen Brennweiten von 15, 21, 30 und 60 cm zum Einsatz [HAK-02].

Bei routinemäßigen Bildflügen, wie sie z.B. vom BEV durchgeführt werden, wird durch sogenannte Mehrzweckflüge ein möglichst großes Anwendungsspektrum für die erhobenen Daten angestrebt. Bei dieser Nutzenoptimierung kommen folgende Aufnahmespezifikationen zum Einsatz:

- Einsatz eines Farbfilmes
- Mittlerer Bildmaßstab von 1:15000

Luftbilder dienen u.a. zur visuellen Auswertung oder als Ausgangsprodukt zur Ableitung weiterer Datengrundlagen welche im Zusammenhang mit dem Thema dieser Arbeit stehen [BEV-05]:

- Qualitätsverbessernde Maßnahmen im Kataster
- Erstellung eines Digitalen Geländemodelles (vgl. Kap. 2.3.4: S. 17)
- Ableitung von digitalen Orthophotos (vgl. Kap. 2.3.5: S. 19)

Satellitenbilder

Im Gegensatz zu Bildflugzeugen kommen bei Satellitensystemen bereits seit den 1970er Jahren digitale, multispektrale Sensoren zum Einsatz, welche auch elektromagnetische Bereiche außerhalb des optischen Spektrums erfassen können. Das Auflösungsvermögen dieser Sensoren ergibt sich somit aus mehreren Faktoren:

- Räumliche Auflösung



8 m/Pixel 16 m/Pixel 32 m/Pixel

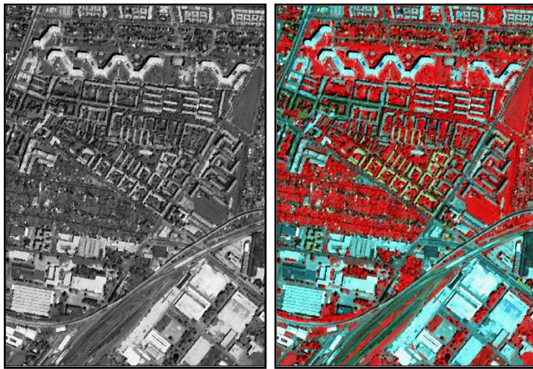
Quelle: in [STE-06]

Die Größe eines Bildelementes (vgl. Abb. 15: S. 16) auf der Erdoberfläche ist abhängig vom Öffnungswinkel des Sensors und der Flughöhe des Aufnahmesystems.

Hochauflösende Aufnahmen unter einem Meter/Pixel stehen zur öffentlichen Nutzung seit 2001 zur Verfügung [STE-06]. Aktuell reichen sie im zivilen bis 41 cm/Pixel (GeoEye-1), im militärischen Bereich bis 5 cm /Pixel [RIE-08].

Abb. 15: Aufnahmen mit unterschiedlichen räumlichen Auflösungen

- Spektrale Auflösung



panchromatisch

multispektral

Quelle: in [STE-06]

Darunter wird die Anzahl und Bandbreite der Spektralbereiche verstanden die ein Aufnahmesystem differenzieren kann. Die Wellenbereiche werden auch Kanäle bzw. Bänder genannt [RIE-08], [STE-06].

panchromatisch: ein breitbandiger Kanal .

multispektral: drei bis sieben schmalbandige Kanäle (vgl. Abb. 16: S. 17).

Abb. 16: Aufnahmen mit unterschiedlichen spektralen Auflösungen

- Radiometrische Auflösung



256 Graustufen

2 Graustufen

Quelle: in [STE-06]

Beschreibt das Differenzierungsvermögen (Anzahl der Graustufen) innerhalb eines Spektralkanals (vgl. Abb. 17: S. 17).

Die radiometrische Auflösung ist u.a. von der räumlichen und spektralen Auflösung abhängig [STE-06] und reicht von 1 – 11 Bit [RIE-08].

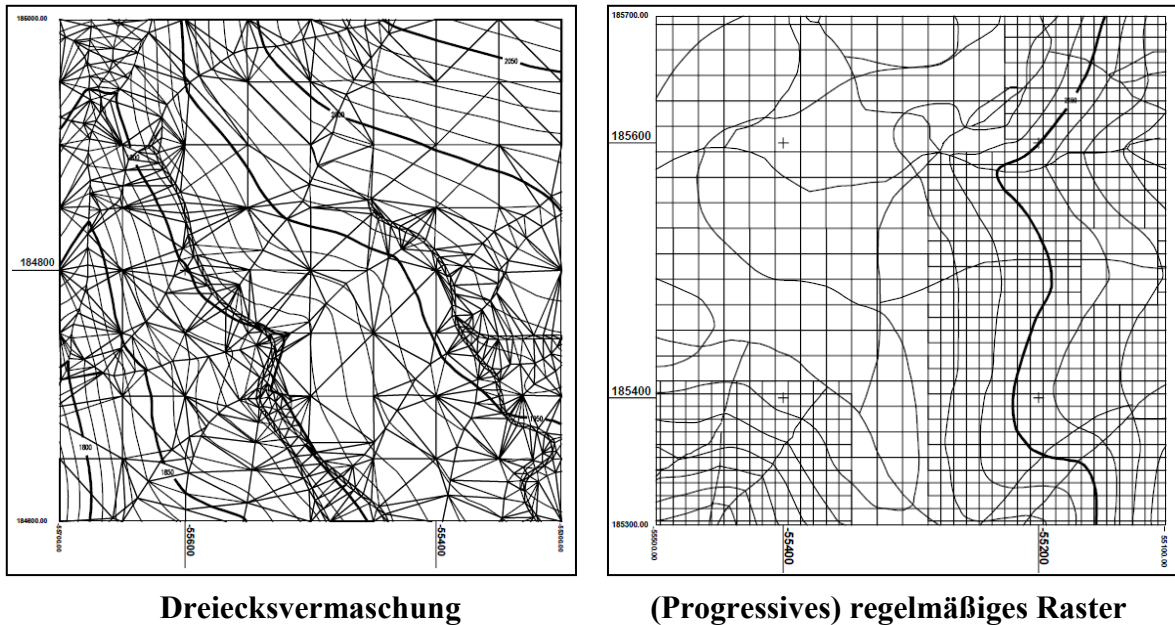
Abb. 17: Aufnahmen mit unterschiedlichen radiometrischen Auflösungen

Ebenso wie Luft- können heutzutage hochauflösende Satellitenbilder als visuelle Grundlage zur Dachflächenableitung herangezogen werden.

2.3.4 Digitales Geländemodell

Das Gelände ist definiert als die Grenzfläche zwischen der Erdoberfläche und der Luft und kann mittels eines digitalen Geländemodelles (DGM) beschrieben werden. Darunter ist eine Menge an regel- oder unregelmäßig verteilter, koordinativ erfasster Geländepunkte zu verstehen. Ergänzende Angaben wie lokale Extremwerte (Bergspitzen, Kuppen) oder

Geländekanten können zu dieser Menge hinzugefügt werden um die Geländeform hinreichend zu präsentieren. Zur Speicherung eines DGMs bieten sich zwei unterschiedliche Datenstrukturen an (vgl. Abb. 18: S. 18).



erforderlich ist, jeweils eine Halbierung der Rasterweite [FRA-06]. Durch den Einsetzpunkt, die Dimension und die Rasterweite ergibt sich implizit die koordinative Zuordnung eines jeden GRID-Elements. Die damit einhergehende effektive Speicherstruktur des GRIDs erlaubt im Gegensatz zum TIN somit auch großflächige Gebiete abzuspeichern [STÄ-04]. Als Nachteil ergibt sich, dass jedem Element des GRIDs nur ein Höhenwert zugeordnet werden kann, man spricht hierbei auch von einem 2,5-dimensionalen Digitalen Höhenmodell (DHM) [BRA-06].

Die Erhebung der Messpunkte des Geländes kann für kleinere Gebiete durch terrestrische Messungen vor Ort erfolgen, im Allgemeinen wird aber auf die weniger aufwendigeren Verfahren der Fernerkundung wie photogrammetrische Luftbildauswertungen (vgl. Kap. 3.2.1: S. 32) oder Laserscanning (vgl. Kap. 3.2.2: S. 35) zurückgegriffen [HAA-06]. Anwendung finden DGM hauptsächlich im Erstellungsprozess von Orthophotos, sie bieten sich aber auch als Datengrundlage für dreidimensionale Visualisierungen und Analysen (vgl. Kap. 2.5: S. 25) an.

Geändeform	Höhengenaugigkeit *
Offen und flach	$\pm 1 \text{ m} - \pm 3 \text{ m}$
Offen und hügelig	$\pm 3 \text{ m} - \pm 5 \text{ m}$
Wald und Hochgebirge	$\pm 5 \text{ m} - \pm 20 \text{ m}$

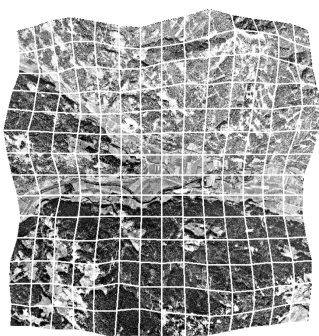
* 10 m Rasterweite

Quelle: in [RIE-08], [BEV-05]

Tab. 3: Genauigkeitsklassen des österreichischen DGM

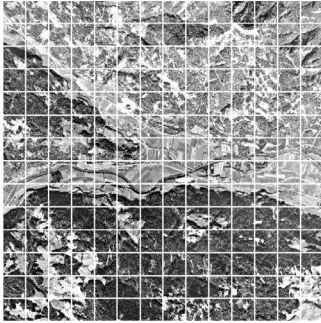
Die Übersicht (vgl. Tab. 3: S. 19) zeigt die geländeformabhängigen Genauigkeitsanforderungen an ein DGM, wie sie in Österreich bei der Produktion von Orthophotos zum Einsatz kommen. Dabei ist anzumerken, dass je nach Anwendungsfall natürlich auch höher aufgelöste DGM erstellt werden können [RIE-08].

2.3.5 Orthophotos



Luftbild

Herkömmliche Photographien (wie auch Luftbilder) stellen, mehr oder weniger genau, eine Zentralprojektion des aufgenommenen Objektes dar. Bei räumlichen Objekten ist damit der Nachteil verbunden, dass, in Abhängigkeit von ihrer Lage und ihrer Höhe, unterschiedliche Maßstabsverhältnisse und dadurch bedingt Verzerrungen im Luftbild auftreten. Da diese Auswirkungen der Zentralprojektion in den meisten Fällen unerwünscht sind, trachtet man danach die Abbildung des Objektes in eine Parallelprojektion zu überführen, in der einheitliche geometrische Bedingungen vorherrschen.



Entzerrtes Luftbild

Quelle: in [FRA-06]

Abb. 19: Luftbild und
Orthophoto

Diese fundamentale Aufgabe im Erstellungsprozess von Orthophotos lässt sich mit dem folgenden Bild veranschaulichen (vgl. Abb. 19: S. 20). Ein quadratisches Rasternetz in der Natur wird im Luftbild als Netz allgemeiner Vierecke abgebildet. Damit diese wieder zu Quadraten entzerrt werden können, bedarf es der differenzierten Betrachtung jener beiden Effekte, welche zur Verzerrung des Luftbildes beigetragen haben.

Perspektivische Verzerrung

Zur Korrektur dieser Art von Verzerrung wird auf die Parameter der inneren und äußeren Orientierung des Luftbildes zurückgegriffen (vgl. Kap. 3.2.1: S. 32). Erstere liegen in Form des Kalibrierungsprotokolls der Messkammer vor, zweite werden entweder bereits während des Fluges aufgenommen, können aber auch nachträglich durch Rückwärtsschnitt der Passpunkte berechnet werden oder werden im Zuge der Aerotriangulation ermittelt [FRA-06].

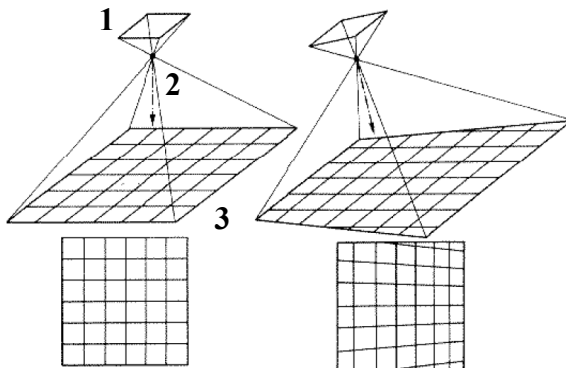
Reliefbedingte Verzerrung

Die auch Radialverschiebung genannte Verzerrung ist umso stärker ausgeprägt je:

- größer die Höhenunterschiede im Gelände ausfallen.
- weiter die Entfernung vom Bildmittelpunkt zunimmt.
- geringer die relative Flughöhe beim Bildflug ausgefallen ist.

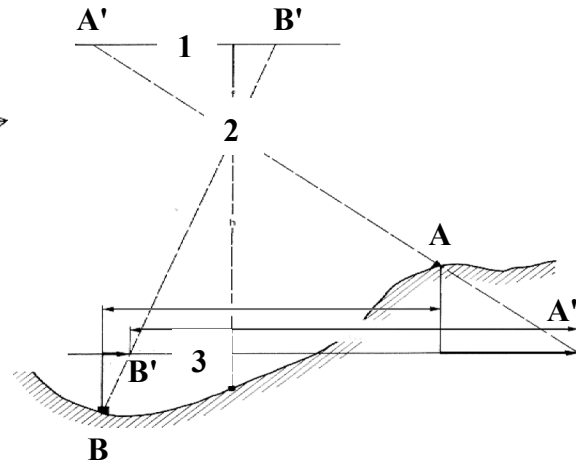
Dadurch werden jene Punkte, die über der Bezugsebene liegen, in der Abbildung nach außen versetzt (vgl. Abb. 20: S. 21) und es ergibt sich ein größerer Maßstab in diesen Bereichen. Punkte unterhalb wandern nach innen, es kommt zu einer Maßstabsverkleinerung. Mittels des Verfahrens der Differentialentzerrung und Kenntnis der Geländehöhen (DGM) ist eine Korrektur der Radialverschiebung möglich [RIE-08].

PERSPEKTIVISCHE VERZERRUNG



- 1 – Bildebene**
- 2 – Projektionszentrum**
- 3 – Objektebene (mittlere Geländehöhe)**

RELIEFBEDINGTE VERZERRUNG



Quelle: in [RIE-08]

Abb. 20: Perspektivische und reliefbedingte Verzerrung in Luftbildern

Orthophotos werden in Österreich mit einer räumlichen Auflösung von 0,25 m/Pixel erstellt. Durch ihren großen, einheitlichen Maßstab ist es möglich daraus Strecken- und Flächenmaße zu entnehmen. Sie eignen sich weiters zur Kombination mit anderen Geodaten um die Orientierung zu erleichtern oder zu einer detaillierteren Darstellung beizutragen. Davon machen auch jene Anwendungsbereiche Gebrauch, welche im Zusammenhang mit der Visualisierung von Dachflächen stehen (vgl. Kap. 2.5.1: S. 25).

2.4 Detaillierungsgrade

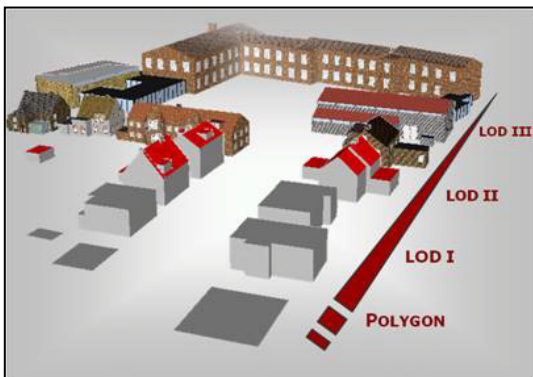
2.4.1 Special Interest Group 3D

Fragen zur Erstellung, Nutzung, Visualisierung und Vermarktung eines 3D-Stadtmodells tauchen spätestens bei dessen Einsatz, mit großer Wahrscheinlichkeit jedoch bereits beim Aufbau auf. Deshalb hat sich die Initiative Geodateninfrastruktur Nordrhein-Westfalen (GDI NRW) im Mai 2002 dazu entschlossen eine Arbeitsgemeinschaft einzurichten, welche sich mit den nun angeführten Schwerpunkten auseinandersetzen soll. [STÄ-04].

Die Special Interest Group (SIG) 3D ist eine offene Arbeitsgemeinschaft mit derzeit ca. 70 Mitgliedern aus den Bereichen Wirtschaft, Wissenschaft und öffentlicher Verwaltung, deren Ziel die Aktivierung des Geodatenmarktes und die Schaffung der Voraussetzungen für den erleichterten Zugang zu Geodaten ist. Dies soll durch ein offenes, interoperables Datenmodell geschehen, welches Semantik und Geometrie urbaner Objekte in einheitlicher Weise abbildet. In Folge dessen kann ein Einsatz und Austausch von 3D-Stadtmodellen innerhalb der mannigfaltigen Anwendungen und Einsatzgebiete (vgl. Kapitel Anwendungsbereiche) der SIG 3D Teilnehmer erfolgen. Diese Vielfalt an Verwendungszwecken stellt natürlich unterschiedliche Anforderungen an das 3D-Stadtmodell hinsichtlich Genauigkeit und Detailreichtum [GRÖ-4].

2.4.2 Level of Detail

Level of Detail (LOD) bezeichnet einen Begriff aus der Computergraphik der zu einer Verminderung des Rechenaufwandes führt. Dies wird durch das Ausnützen von kaum oder nicht wahrzunehmenden Unterschieden zwischen einem qualitativ hochwertigen und einem qualitativ niederwertigeren Objekt erreicht. Der LOD eines Objektes ist hierbei die daraus resultierende Qualitätsstufe, welche sich im allgemeinen im zu vertretenden Qualitätsverlust bei einer bestimmten Entfernung des Betrachters zum Objekt widerspiegelt [DGL-09].



Quelle: in [GPX-09]

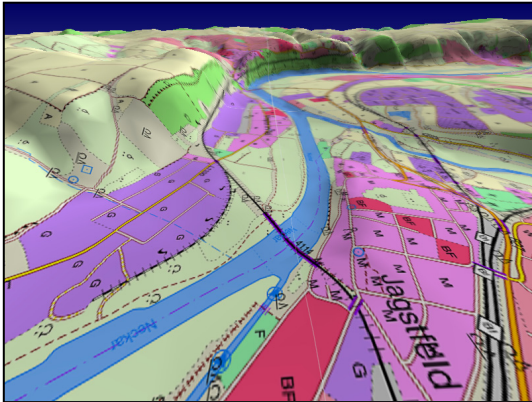
Die SIG 3D definiert für 3D-Stadtmodelle fünf unterschiedliche Detaillierungsgrade (Abb. 21: S. 22), beginnend mit dem größten LOD 0, bis hin zu dem am höchsten aufgelösten LOD 4. Zu den differenzierten Merkmalen innerhalb eines LOD zählen:

- Umfang an modellierten Objektarten
- Geometrische Genauigkeit
- Detailreichtum der Modellierung

Abb. 21: Detailstufen der Gebäudemodelle

Die so eingeführten Detaillierungsgrade stellen ein Qualitätskriterium dar, welches die Eignung, den Vergleich sowie die Klassifikation von 3D-Stadtmodellen (verschiedener Datenlieferanten) ermöglicht [GRÖ-4]. Folgende Übersicht, entnommen aus [STÄ-04], listet die fünf Stufen nun im Detail auf, wobei auf dachspezifische Merkmale eingegangen wird.

LOD 0 – Regionalmodell



Quelle: in [LAN-09]

Abb. 22: LOD 0 – Regionalmodell

- „Regionalmodell“ in Form eines Digitalen Geländemodelles (DGM) in 2,5D mit Textur/Orthophoto oder Flächennutzung
- Erfassungsgeneralisierung: maximal und Klassifizierung nach Flächennutzung
- Dachform/-struktur: Keine
- Punktgenauigkeit: >5m/>5m Lage/Höhe

Da in dieser Detailstufe keine Gebäudemodelle zum Einsatz kommen (vgl. Abb. 22: S. 23), entfällt somit auch eine Betrachtung hinsichtlich der Dachflächen.

LOD 1 – Stadt-/Standortmodell



Quelle: in [HAU-05]

Abb. 23: LOD 1 – Klötzchenmodell

- „Klötzchenmodell“ ohne Dachstrukturen
- Erfassungsgeneralisierung: Objektblöcke in generalisierter Form > 6m*6m Grundfläche
- Dachform/-struktur: ebene Flächen
- Punktgenauigkeit: 5m/5m Lage/Höhe

Das sogenannte „Klötzchen-“ bzw. Blockmodell bildet die Basisstufe für die Gebäudemodellierung (vgl. Abb. 23: S. 23). Mit geringem Aufwand kann diese Detailstufe aus bestehenden 2D-Datenbeständen, wie dem Kataster, abgeleitet werden und steht dadurch vorteilhafterweise flächendeckend zur Verfügung. Da in diesen Datenquellen keine Informationen über die Dachausprägung eines Gebäudes vorhanden sind muss auch im Modell auf Dachstrukturen verzichtet werden.

LOD 2 – Stadt-/Standortmodell



Quelle: in [GDI-08]

Abb. 24: LOD 2 – Detailmodell

- „Detailmodell“ mit Texturen, differenzierten Dachstrukturen und Vegetationsmerkmalen (z.B. Bäume)
- Erfassungsgeneralisierung: Objektblöcke in generalisierter Form > 4m*4m Grundfläche
- Dachform/-struktur: Dachtyp und Ausrichtung
- Punktgenauigkeit: 2m/1m Lage/Höhe

Ab dieser Detailstufe sind den Gebäudemodellen Dächer und ggf. Texturen (vgl. Abb. 24: S. 24) zugeordnet, dies führt zu einer Erhöhung des Wiedererkennungswertes des sogenannten „Detailmodells“ jedoch besteht ab dieser Detailstufe zusätzlicher Aufwand bei der Erstellung des Modelles.

LOD 3 – Stadt-/Standortmodell



Quelle: in [GDI-08]

Abb. 25: LOD 3 – Architekturmodell

- „Architekturmodell“ mit detailliert modellierten Gebäude- und Dachstrukturen, Vegetation und Straßenmöblierung (vgl. Abb. 25: S. 24)
- Erfassungsgeneralisierung: Objekte in realer Form; > 2m*2m Grundfläche
- Dachform/-struktur: reale Form
- Punktgenauigkeit: 0,5m/0,5m Lage/Höhe

Das „Architekturmodell“ wird durch hochauflösende Texturen sowie ein fein ausdifferenziertes Geometriemodell mit Öffnungen wie Türen und Fenster und realer Dachkonstruktion beschrieben [GRÖ-04].

LOD 4 – Innenraummodell



Quelle: in [GDI-08]

Abb. 26: LOD 4 – Innenraummodell

- „Begehbare“ Architekturmodelle
- Erfassungsgeneralisierung: reale Form und Abbildung konstruktiver Elemente und Öffnungen
- Dachform/-struktur: reale Form
- Punktgenauigkeit: 0,2m/0,2m Lage/Höhe

Diese Erweiterung ermöglicht die virtuelle Begehrbarkeit von Gebäuden (vgl. Abb. 26: S. 25), womit sich z.B. Einsatzmöglichkeiten im Immobilienbereich oder als Leitsysteme in Museen ergeben.

2.5 Anwendungsbereiche

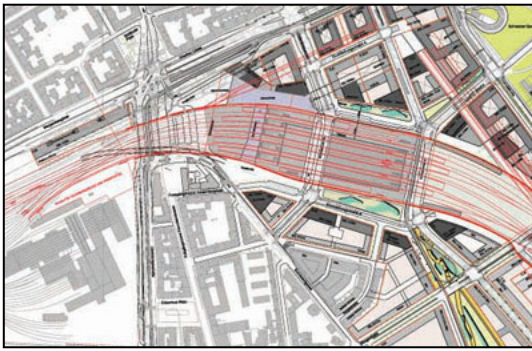
Wie bereits erwähnt dienen 3D-Stadtmodelle als Grundlage für Anwendungen, die sich in die Bereiche Visualisierung und Analyse gliedern lassen. Dies soll nun anhand einiger konkreter Einsatzbereiche demonstriert werden, wobei auf dachspezifische Merkmale über die Angabe des empfohlenen Detaillierungsgrades eingegangen wird. Dabei ist anzumerken, dass sich in der Literatur keine konkreten Angaben diesbezüglich finden, der oder die empfohlenen LODs werden anhand der beschriebenen Anforderungen des Einsatzbereiches im Einklang mit dem Kapitel Detaillierungsgrade abgeleitet.

2.5.1 Visualisierung

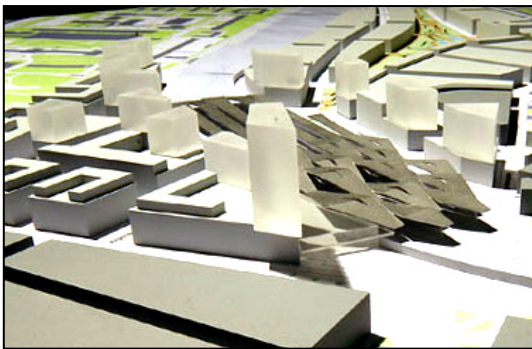
Bei der Visualisierung wird das Modell zur Betrachtung optimiert. Die Darstellung muss weitgehend detailgetreu sein und einen realistischen Eindruck hinterlassen [KOP-02].

Stadtplanung

Um die Verständlichkeit bevorstehender städtebaulicher Projekte für die Öffentlichkeit zu erhöhen, bedient sich die Stadtplanung oft kartenverwandter Hilfsmittel, wie z.B. des maßstäblichen Baumassenmodells (aus Holz, Karton oder Kunststoff) und in den letzten Jahren zunehmend auch des virtuellen Computermodells.



Plan



Baumassenmodell



Computermode

Quelle: in [ÖBB-09]

Abb. 27: Stadtplanung

In den Planungsvorhaben der Vergangenheit musste die dreidimensionale Information über zweidimensionale Karten und Pläne (vgl. Abb. 27: S. 26) übermittelt werden, die aber oft nur Fachleuten durch ihr Expertenwissen und Abstraktionsvermögen verständlich sind. Die Kommunikation städtebaulicher und architektonischer Veränderungen soll durch virtuelle 3D-Stadtmodelle wesentlich verbessert werden. Es ist nun auch möglich von beliebigen Standpunkten aus Sichtbeziehungen zu visualisieren, Verdeckungen zu prüfen oder markante Änderungen der Stadtsilhouette sichtbar zu machen – photographische Tricks und Makroaufnahmen mit Spezialobjektiven im Baumassenmodell werden somit entbehrlich.

Folgende Anforderungen an ein 3D-Stadtmodell, das in der Stadtplanung zum Einsatz kommen soll, lassen sich somit ableiten:

- präzise Abbildung des Gebäudeumrisses
- möglichst wirklichkeitsnahe Abbildung der Gebäudehöhe und der Dachgeometrie
- wirklichkeitsähnliche Abbildung der Gebäudefassaden und der Erdoberfläche durch photographische oder graphische Gestaltung
- Darstellung von Modellen mit einer genügend großen räumlichen Ausdehnung mit hohem Detaillierungsgrad [STÄ-04]

Bei der Wahl des Detaillierungsgrades im Einsatzbereich Stadtplanung ist in erster Linie der gewünschte Abstraktionsgrad mit einzubeziehen. So sollte das Interesse dem Projekt und nicht dem umgebenden 3D-Stadtmodell gelten, dieses also dezent in den Hintergrund der Szene treten. Laut Städtetag NRW kann aber eine zu hohe Abstraktion wiederum dazu führen, dass die Planungspräsentation ungenügend vermittelt wird und nicht der später fertig gestellten baulichen Realität entspricht [STÄ-04]. In Anbetracht dessen kann eine anwendungsabhängige Nutzung von LOD 1 bis LOD 2 empfohlen werden, in Einzelfällen,

wie z.B. bei einem Um-/Anbau, kann möglicherweise auch eine Darstellung der betroffenen Gebäude in LOD 3 stattfinden.

Tourismus



Quelle: in [ULM-06]



Quelle: in [FHW-09]

Abb. 28: 3D-Stadtmodell Salzburg

Abb. 29: Begehrbarer Athenatempel

Eine weitere Möglichkeit der Visualisierung von 3D-Stadtmodellen ergibt sich seit der Verfügbarkeit leistungsfähiger Computer. Der sogenannte „virtuelle Spaziergang“ erlaubt die interaktive Navigation innerhalb virtueller Szenen und bietet sich bei Beachtung einer einfachen, intuitiven Bedienung, entsprechendem Informationsgehalt und Berücksichtigung von Implementierungsstandards hervorragend zur Darstellung von touristischen oder historisch interessanten Objekten an. Im Gegensatz zum konventionellen Werbemittel Text und Bild als Informationsträger ergeben sich beim Einsatz der beschriebenen Methode folgende Vorteile:

- Die Destination kann dem Gast schon vor Antritt der Reise präsentiert werden. Dabei können nicht nur punktuelle Sehenswürdigkeiten dargestellt werden, sondern auch komplette Gebiete (Abb. 28: S. 27) wie z.B. die Salzburger Altstadt (UNESCO Weltkulturerbe).
- Begehrbare Sehenswürdigkeiten lassen den Gast in das 3D-Stadtmodell „eintauchen“ (vgl. Abb. 29: S. 27) oder vermitteln den Ausblick des zu buchenden Hotelzimmers.
- Rekonstruktionen historisch interessanter, aber bereits verschwundener Stätten können ins Stadtmodell eingegliedert werden [KOP-02], [STÄ-04].

Bei der Wahl der Detailstufe im Einsatzbereich Tourismus ist differenziert vorzugehen. So ist als Empfehlung bei punktuellen Sehenswürdigkeiten LOD 3 abzugeben um eine möglichst realitätsnahe Darstellung zu ermöglichen. Falls vorhanden, geben LOD 4 Modelle ausgewählter Orte dem 3D-Stadtmodell natürlich einen besonderen Reiz. Der Rest des modellierten Gebietes sollte in LOD 2 vorhanden sein, wobei für die Texturierung jener Gebäude, welche von keinem besonderen anwendungsspezifischen Interesse sind, durchaus wiederverwendbare Fassadenbilder angewendet werden können, „[...] da die Texturierung die aufwändigste Arbeit bei der Aufstellung eines 3D-Modells ist“ [STÄ-04].

3D-Navigationssysteme



Quelle: in [DIG-09]

Abb. 30: Navigationsgerät mit 3D-Ansicht

In den vergangenen Jahren haben sich digitale Navigationssysteme auf den verschiedensten Anwendungsebenen zu einer festen Größe entwickelt. Sowohl im Internet als auch auf mobilen Endgeräten gehören Routenplaner und Navigationshilfen mittlerweile zum gebräuchlichen Standard bei der Nutzung von Geodaten und sind somit ins Bewusstsein einer breiten Öffentlichkeit gerückt.

In der Anfangszeit beschränkten sich diese Systeme ausnahmslos auf eine zweidimensionale Kartendarstellung senkrecht zur Projektionsebene, später kamen Systeme mit einem Pseudo-3D-Effekt auf den Markt, in der die Darstellung als perspektivische Schrägansicht aus der Vogelperspektive stattfindet. Aktuelle Trends zeichnen sich durch die Integration von 3D-Geländemodellen und –Stadtmodellen in die vorhandenen 2D-Daten aus (vgl. Abb. 30: S. 28). Dabei ist zu bedenken, dass es sich hierbei um sehr großflächige Gebiete handelt, welche durchaus mehrere Länder umspannen. Für solch einen Einsatzzweck ist die Datenakquisition von 3D-Stadtmodellen daher enorm aufwändig. Um das Geschäftsrisiko so gering wie möglich zu halten ging es daher bei der Markteinführung von 3D-Navigationssystemen zunächst nur darum, die wichtigsten Zentren und Ballungsräume abzudecken. In Abhängigkeit von der Kundenakzeptanz kann davon ausgegangen werden, dass die Hersteller den Datenbestand in den Folgejahren in der Fläche u.U. verdichten. Funktionelles Ziel der Darstellung von 3D-Stadtmodellen ist es nicht, dem Nutzer die komplette Route in dreidimensionalen Ansichten zu präsentieren, sondern dieses Service auf den Nahbereich um den Zielpunkt zu beschränken. Dazu bedarf es jedoch noch detaillierterer Erhebungen und Forschungen durch die Anbieter (vor allem aus der Automobilindustrie), insbesondere in Richtung sinnvoller Informationsdichte und Darstellungsform, sodass der Nutzer vom realen Geschehen nicht zu sehr abgelenkt wird [STÄ-04].

Betrachtet man die heute gängigen 3D-Navigationssysteme im Kontext der Detaillierungsgrade eines 3D-Stadtmodelles, kommt als Hauptebene ein LOD 0 Regionalmodell – meist ausgeführt als thematischer Straßenkarte – zum Einsatz. Unbeachtet der Eignung spricht gegen eine Nutzung von Orthophotos schon allein deren Speicherbedarf, welcher auf mobilen Geräten zurzeit noch ein Ausschlusskriterium darstellt. Je nach Leistungsfähigkeit des Gerätes können diese Darstellungen mit Points of Interest (POI), also anwendungsspezifisch besonders interessanten Punkten, kombiniert werden. Für diese Modell werden Detailstufen zwischen LOD 2 und LOD 3 eingesetzt, wobei die knapp bemessene Bildschirmfläche des Gerätes nicht außer Acht gelassen werden darf.

2.5.2 Analyse

Während sich die Nutzungen von 3D-Stadtmodellen zur Visualisierung allmählich etablieren und ausreifen, gestaltet sich der Anwendungsbereich der Analyse von räumlichen, dreidimensionalen Datensätzen weit weniger vorangeschritten [CZA-04]. Nichtsdestotrotz wäre bei Aufnahme semantischer Eigenschaften, wie z.B. den in Folge angeführten analysespezifischen Anforderungen in den Erstellungsprozess von visualisierungsbezogenen 3D-Stadtmodellen, eine Doppelnutzung möglich. Somit würde die zeit- und kostenintensive parallele Datenführung der einzelnen Anwendungsbereiche entfallen [STÄ-04].

Mobilfunk

Zu Beginn der 1990er Jahre entstand mit der breiten Vermarktung der Mobilfunknutzung und der damit notwendigen flächendeckenden Netzausbreitung für die betreibenden Unternehmen das Bedürfnis der optimierten Planung ihrer Funknetze [KOP-02]. Dafür wurden die ersten zur räumlichen Analyse eingesetzten 3D-Stadtmodelle aufgebaut, welche sowohl von geometrischen als auch inhaltlichen Parametern abhängig waren:

- Punktgenauigkeit und Detailreichtum der Modellierung
- Einbeziehung von Objekteigenschaften wie Oberflächenrauigkeit und Reflexionsgrad

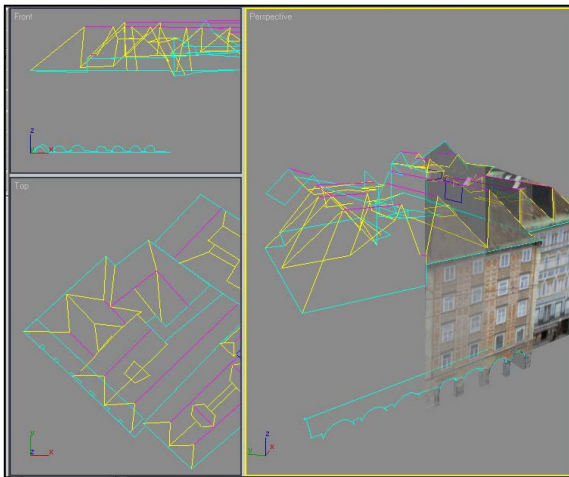
In den resultierenden Modellen wurden einzelne Gebäude zu Blöcken zusammengefasst, der Städtetag NRW merkt dazu an, dass sie somit nach heutiger Definition nicht einmal dem LOD 1 entsprechen würden, desweiteren war keine Modellierung der Oberflächenrauigkeit enthalten. Durch diese sehr spezifische Ausrichtung eröffneten sich kaum anderweitige Einsatzmöglichkeiten für diese 3D-Stadtmodelle [STÄ-04].

Lärmschutz

Eines der schlagkräftigsten Argumente (zum Aufbau und) zur Nutzung eines fortschreibungsfähigen 3D-Stadtmodells ist in der Forderung der Durchführbarkeit von Lärmausbreitungsberechnungen zu sehen. Dabei sind die zuständigen Instanzen aufgefordert jene Bereiche innerhalb ihres Territoriums festzustellen, die in besonderem Maße von Lärm betroffen sind, um darauf aufbauend Maßnahmen der Lärminderung zu planen. Die Forderung beruht zumeist auf nationaler Gesetzgebung sowie seit 2002 auf einer EU-Richtlinie, laut der die Anzahl lärmbelasteter Fassaden sowie der betroffenen Einwohner zu ermitteln ist.

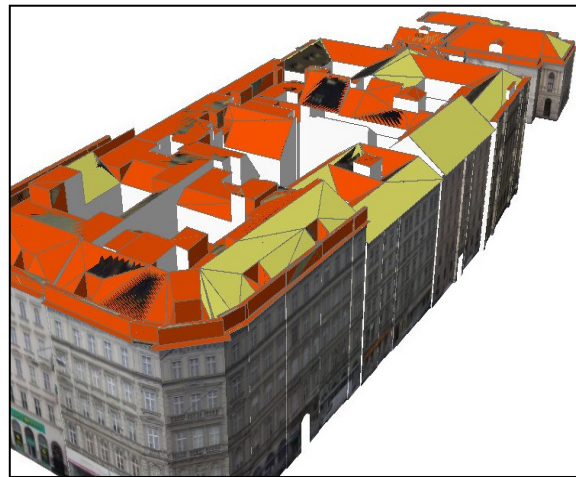
Eine Angabe der empfohlenen Detailstufe entfällt, da bei dieser Analyse mit unsegmentierten Datensätzen wie z.B. einem DGM gearbeitet wird [DOR-08], [STÄ-04]. Der Detaillierungsgrad der daraus resultierenden Modelle kann aber nicht mit jenen der SIG-3D (vgl. Kap. 2.3: S. 11) verglichen werden.

GIS-Analyse



— Gebäude — Grat — First

Quelle: in [KER-05]



■ Südorientierte Dachflächen

Quelle: in [KER-05]

Abb. 31: 3D-Stadtmodell Modellierung

Abb. 32: 3D-Stadtmodell Analyse

Der Vorteil bei der Analyse von strukturierten, aus der Visualisierung bekannten, 3D-Stadtmodellen im Gegensatz zu unstrukturierten Datensätzen zeigt sich in folgendem Beispiel:

Unter der Annahme, dass die Modellierung und Attributierung (vgl. Abb. 31: S. 30) eines Gebäudes anhand seiner diskreten Bestandteile erfolgte, erlaubt eine Analyse sehr differenzierte und mit hohem Informationsgehalt verbundene Abfragen. So können diese Bestandteile innerhalb eines GIS anhand der Attribute in Dach und Nicht-Dach kategorisiert werden. Anschließend wird diese Selektion weiter eingengt, indem die Geometrie eine Neigung zwischen 25° und 60° und eine Ausrichtung zwischen 135° und 225° (Südsektor) aufweisen muss. Für die gefundenen Dachflächen (vgl. Abb. 32: S. 30) kann anschließend über das Attribut des Gebäudeschlüssels der Gebäudeeigentümer festgestellt sowie deren Fläche ermittelt werden [KER-05].

3 Methoden und Verfahren zur Erstellung von Dachflächenmodellen

Bis zu diesem Zeitpunkt wurde in den Ausführungen zur Anwendung von 3D-Stadtmodellen deren Verfügbarkeit schlichtweg angenommen, in der Realität kann aber nur von einem punktuellen Vorhandensein solcher Modelle ausgegangen werden (vgl. Kap. 2.1: S. 4). Kommt es zum Aufbau eines 3D-Stadtmodelles, hat man sich abhängig von dessen zukünftiger Nutzung mit unterschiedlichen Problemstellungen auseinanderzusetzen, sei es die Beschaffung von Texturen, Aufbereitung eines DGMs oder die Erstellung von Objektgruppen (vgl. Kap. 2.1.2: 5). Wie bereits erwähnt, stellt das Dach einen prägenden Bestandteil der zentralen Objektgruppe der Gebäude dar und bedarf somit besonderer Beachtung im Erstellungsvorgang. In diesem Kapitel soll nun eine ausführliche Betrachtung der dabei entscheidenden Kriterien und Abläufe stattfinden. Unterschiedliche Methoden und Modelle können im Verfahren der Dachflächenmodellierung zur Anwendung kommen, wobei die Kenntnis derer Vor- und Nachteile bei der späteren Auseinandersetzung mit der Forschungsfrage von großer Bedeutung sein wird.

3.1 Übersicht des Erstellungsvorganges

Die Durchführung des Erstellungsvorganges sollte kostengünstig, flächendeckend sowie wiederhol- und vergleichbar sein [STE-00]. Im Laufe der Zeit entwickelten sich dazu:

- mehrere unterschiedliche Verfahren (vgl. Kap. 3.4: S. 45),
- welche je nach verfügbarer Datengrundlage
- und dem gewünschten Detaillierungsgrad

zur Anwendung kommen können. Die Zusammensetzung dieser drei Kriterien (vgl. Abb. 33: S. 32) ist bestimmend für die Beschaffenheit der modellierten Dachflächen. Bei den dabei erwähnten Verfahren handelt es sich jeweils um zweistufige Prozesse, bestehend aus [JAN-03]:

- a. der Auswertung von Datengrundlagen zur Gewinnung von Dachflächenmerkmalen
- b. und der Modellierung von Dachflächen auf Basis dieser Merkmale.

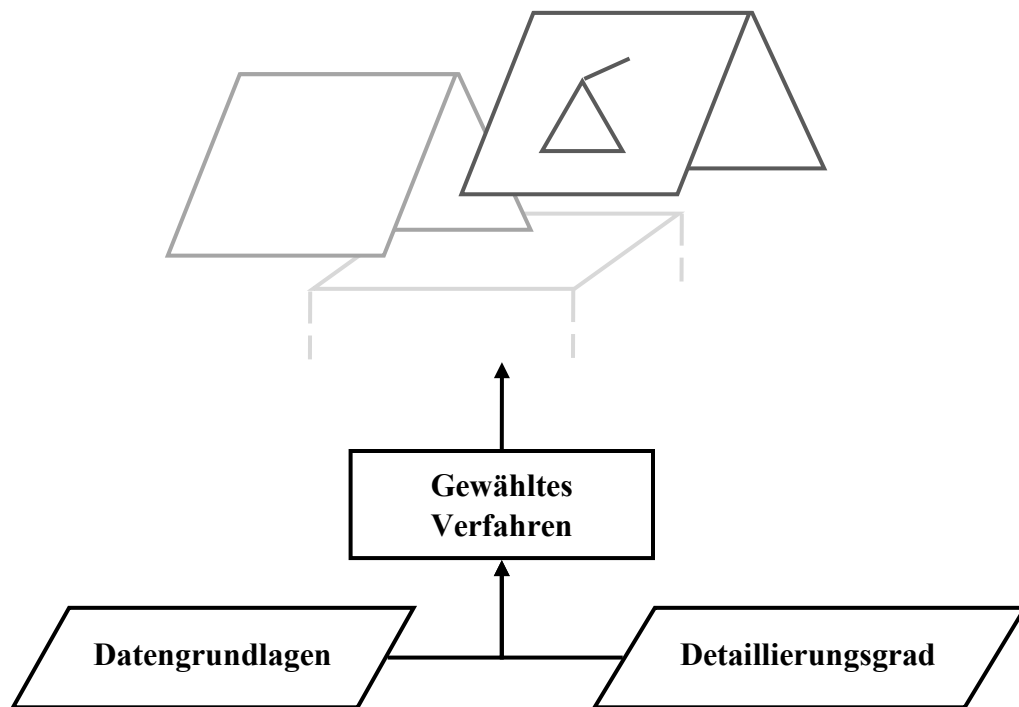


Abb. 33: Schematischer Ablauf der Erstellung von Dachflächenmodellen.

3.2 Methoden zur Auswertung

Das Ziel dieses Prozesses ist die Auswertung unstrukturierter, georeferenzierter Datengrundlagen zur koordinatenmäßigen Bestimmung charakterprägender Merkmale der Dachflächen. Es handelt sich dabei entweder um Erhebung von für Dachflächen formbestimmenden, Schnittpunkten der Dachkanten (vgl. Abb. 3: S. 8) oder aber um Abtastungen der kompletten Oberfläche einer Dachfläche. Generell gilt aber, dass jedes Merkmal herangezogen werden kann, aus dem sich die Form einer Dachfläche ableiten lässt. Abhängig von der angewandten Auswertungsmethode ist man mit unterschiedlichen Datengrundlagen und Problematiken der Erhebung konfrontiert, durch den erreichbaren Genauigkeitsgrad wird außerdem der Anwendungsbereich eingeschränkt.

3.2.1 Photogrammetrie

Mit Hilfe dieser Methode ist die Rekonstruktion dreidimensionaler Objekte, aus zwei sich überlappenden, zweidimensionalen Abbildern der Objekte möglich. Der räumliche Effekt tritt ein, wenn die gegenseitige Lage der Bilder bzw. Luftbilder (vgl. Kap. 2.3.3: S. 15) zum Zeitpunkt der Aufnahme wiederhergestellt wird. Dies ist bei Kenntnis der folgenden Parameter möglich [FRA-05].

Innere Orientierung

Sie beschreibt die Lage des auf die Bildebene bezogenen Projektionszentrums O durch die zwei Koordinaten X' , Z' und die Objektbrennweite C_k (vgl. Abb. 34: S. 33). Das zugrundeliegende Koordinatensystem wird durch die Bildecken aufgespannt, mit dem Bildmittelpunkt M' im Ursprung. Der Bildhauptpunkt H' ist der Fußpunkt des Lotes durch das Projektionszentrum O , der im Idealfall mit dem Bildmittelpunkt ident sein sollte. Der Abstand zwischen Projektionszentrum und Lotfußpunkt, die Objektbrennweite C_k , wird auch als Kammerkonstante bezeichnet. Die Lage des Bildhauptpunktes sowie die Kammerkonstante werden vom Hersteller bei der Kalibrierung des Objektives mit hoher Genauigkeit bestimmt.

Äußere Orientierung

Hiermit wird die Lage des Projektionszentrums und der Richtung der Bildebene relativ zum Aufnahmeobjekt angegeben. Die Lage wird durch das Koordinatentripel (x, y, z) des Projektionszentrums O beschrieben, die Richtung durch drei voneinander unabhängige Drehwinkel bestimmt, Azimut α , Neigung ν und Kantung κ . Bei Senkrechtaufnahmen gibt das Verhältnis $C_k:h$ (Kammerkonstante zu Flughöhe) den Abbildungsmaßstab an.

Lage und Richtung werden genähert, während des Bildfluges aufgezeichnet und lassen sich mit Hilfe der – in Bild- und Objektebene koordinativ bekannten – Passpunkte berechnen [WIK-09g], [FRA-05].

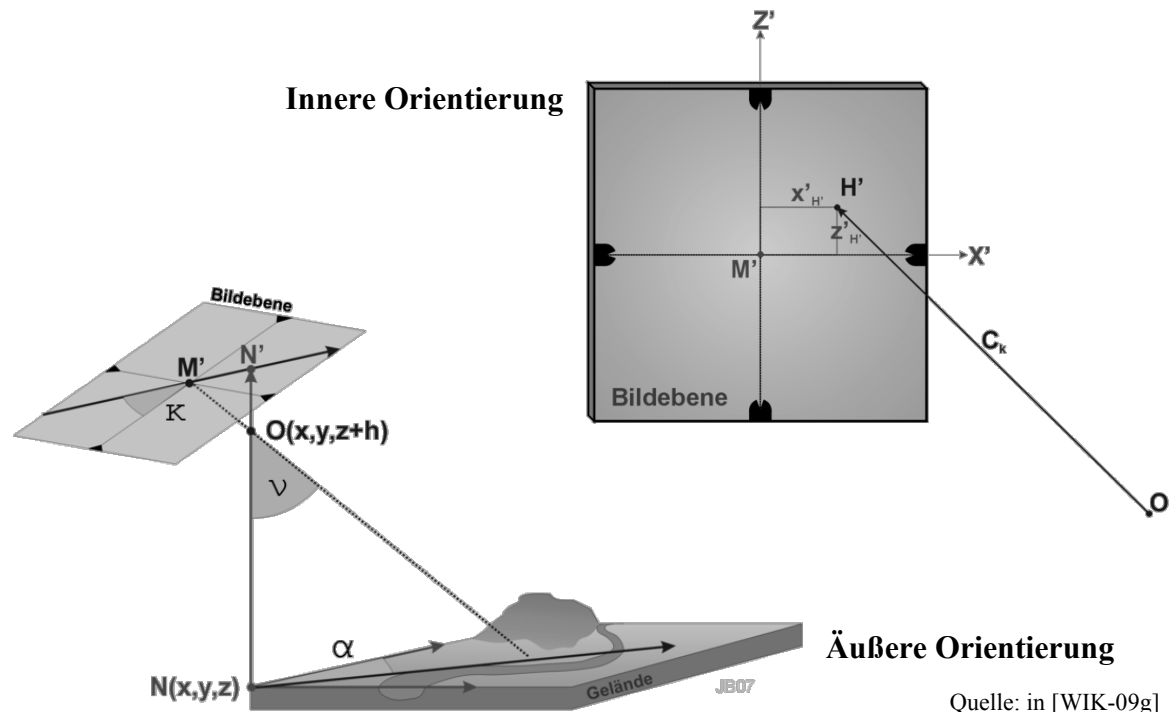


Abb. 34: Parameter der inneren und äußeren Orientierung

Sobald die Orientierung der Luftbilder wiederhergestellt ist, kann eine dreidimensionale Betrachtung erfolgen. Um die Aufnahmesituation auswerten zu können muss jedoch zuvor ein Bezug zum äußeren Koordinatensystem gegeben sein. Die Transformation von der relativen hin zu einer absoluten Orientierung erfolgt mit Hilfe der bereits erwähnten Passpunkte.



— Erfasste Dachflächen

Quelle: in [ULM-06]

Abb. 35: Photogrammetrische Auswertung von Dachflächen

Die soeben beschriebenen Vorgänge stehen am Anfang jeder photogrammetrischen Auswertung und werden im Zuge der Zweistufenorientierung oder des Blockausgleiches durchgeführt. Der eigentliche Auswerteprozess erfolgt anschließend auf einer digitalen Auswertestation, die eine räumliche Betrachtung der (digitalen) Luftbilder ermöglicht. Bedient werden diese Systeme hauptsächlich durch Computermouse-ähnliche Eingabegeräte, welche neben der Lage- auch eine Höheneinstellung registrieren können und somit eine vollständige Erfassung der dreidimensional dargestellten Objekte erlauben [FRA-05]. Bei den zu erhebenden Objekten handelt es sich in diesem Fall um die punkthaften Dachflächenmerkmale, diese werden zuerst in X- und Y-Richtung mit der Messmarke (dem Mauscursor) angefahren. Anschließend wird diese dann auf der Z-Achse höhenmäßig auf den zu messenden Punkt aufgesetzt (vgl. Abb. 35: S. 34) [HAA-06].

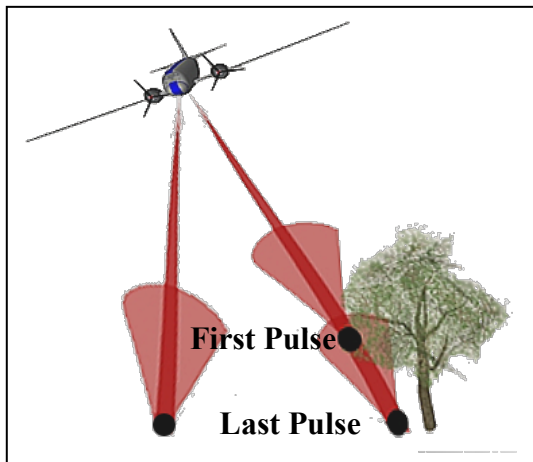
Die dabei erforderliche visuelle Interpretation basiert auf Differenzierung der in den Luftbildern enthaltenen Strukturen, Formen und Texturen. Als visuelle Hilfestellung können die Gebäudegrundrisse eines Katasters als unterstützende Datengrundlage herangezogen werden, da bei einer Dachflächenerhebung Störfaktoren wie z.B. überhängende Bäume und Schattenwurf den Messvorgang behindern können [STE-00]. Dies zeigt, dass bei der photogrammetrischen Luftbildauswertung zumindest der kritische Auswerteschritt der Objektinterpretation durch einen menschlichen Operateur vollzogen werden muss, da vollautomatische Ansätze zur Gebäudeextraktion mittels Bildanalyse das Forschungsstadium noch nicht verlassen haben [JAN-03], [STÄ-04]. Elaborierte Verfahren können jedoch auf Basis manueller Grobmessungen automatisierte Feinmessungen einsetzen, die den Auswertevorgang erheblich beschleunigen (vgl. Kap. 3.4.1: S. 45). Durch den manuell durchgeführten Auswertevorgang und die hohe räumliche Auflösung der Luftbilder gilt die Photogrammetrie als die genaueste Auswertemethode für

Dachflächen. Das Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen gibt die Genauigkeit mit 0,15 ‰ der Flughöhe an, i.A. liegt sie zwischen 0,1 – 0,2 m [STÄ-04], [ULM-06], sie eignet sich damit zur detaillierten Erfassung der Dachlandschaft samt Gauben und Kaminen.

3.2.2 Laserscanner-Auswertung

Laserscanning ist eine Methode zur schnellen dreidimensionalen Datenerfassung auf der Basis von Winkel- und Streckenmessungen. Die kombinierte Sende-/Empfangeinheit des Laserscanners führt dabei innerhalb eines definierten horizontalen und vertikalen Bereiches eine nichtselektive, rasterweise Abtastung der Umgebung durch. Bei diesem aktiven Verfahren der Fernerkundung(vgl. Kap. 2.3.3: S. 15) wird ein Laserstrahl ausgeschiedt, bei eintreffenden Reflexionen werden die Signallaufzeit sowie die Ausrichtung des Empfängers registriert. Im Falle von Gebäudeaufnahmen kommen terrestrische oder fluggestützte Systeme zum Einsatz, wobei hier auf letzteres, das sogenannte Airborne Laserscanning (ALS), eingegangen wird.

Während das Flugzeug das Aufnahmegebiet in einigen Hundert bis 3000 Metern streifenweise überfliegt wird ein quer zur Flugrichtung schwenkender Laserstrahl ausgesandt, der reflektorlos zurückgestrahlt und registriert wird. Durch die gleichzeitige Protokollierung der Position und Lage des Aufnahmesystems mittels Positions- und Trägheitsnavigationssystem ist ein Bezug der relativ erfassten, dreidimensionalen Punktwolke zu einem übergeordneten Koordinatensystem samt Höhenangabe möglich [BRA-06]. Als Befliegungsergebnis entsteht eine Unmenge an räumlichen Messungen der jeweils höchsten Punkte des Geländes, sei es nun die freie Erdoberfläche selbst oder sich darauf befindliche natürliche (Vegetation) bzw. künstliche Objekte (Gebäude). Eine Reihe von Anwendungen wie z.B. Funknetzplanung, Klimamodellierung, etc., kann direkt mit der unstrukturierten Punktwolke bedient werden, im Zuge der Erhebung von Dachlandschaften bedarf es allerdings einer Segmentierung des Datensatzes in Bodenpunkte und Nicht-Bodenpunkte mittels Einsatz von Filtermethoden [STÄ-04].



Quelle: ergänzt nach [GPX-09]

Abb. 36: Vegetationsdurchdringung des Laserscanners

Dazu macht man sich die Fähigkeit gepulster Laserscanner zu Nutze um die erste und letzte Reflexion des ausgesandten Signales differenziert detektieren zu können. Solche Mehrfachreflexionen entstehen z.B. bei der Abtastung von Bäumen, da der Laserstrahl die Vegetationsschicht durchdringen kann (vgl. Abb. 36: S. 36). Aufgrund dieser Eigenschaft ist es möglich den Rohdatensatz in einen First Pulse-Datensatz (höchste Messpunkte auf den Baumkronen) und einen Last Pulse-Datensatz (Messpunkte der darunterliegenden Erdoberfläche) zu trennen. Je nach Wahl eines der beiden Datensätze lassen sich daraus unterschiedliche Modelle erzeugen (vgl. Abb. 37: S. 37):

- Das Digitale Höhenmodell, welches wie bereits erwähnt auch durch photogrammetrische Auswertung gewonnen werden kann (vgl. Kap. 2.3.4: S. 17) lässt sich aus dem Last Pulse-Datensatz erstellen. Im Gegensatz zur Photogrammetrie können damit auch bewaldete (verdeckte) Gebiete ausgewertet werden.
- Das Digitale Oberflächenmodell (DOM, bzw. im englischen DSM) beschreibt einerseits, so wie das DHM, offene Geländeoberflächen, aber ggf. auch die sich darauf befindlichen Objekte wie Autos, Gebäude, etc. Verwendet man zur Erstellung den First Pulse-Datensatz, so fällt auch die Vegetation darunter.
- Aus den beiden vorhin genannten Modellen lässt sich ein normiertes Digitales Oberflächenmodell (nDSM) bilden, welches die relativen Höhen der Objekte über der Erdoberfläche enthält. Die Berechnung des Offsets der Referenzfläche wird durch einfache Subtraktion erreicht:

$$nDSM = DOM - DHM \quad (2)$$

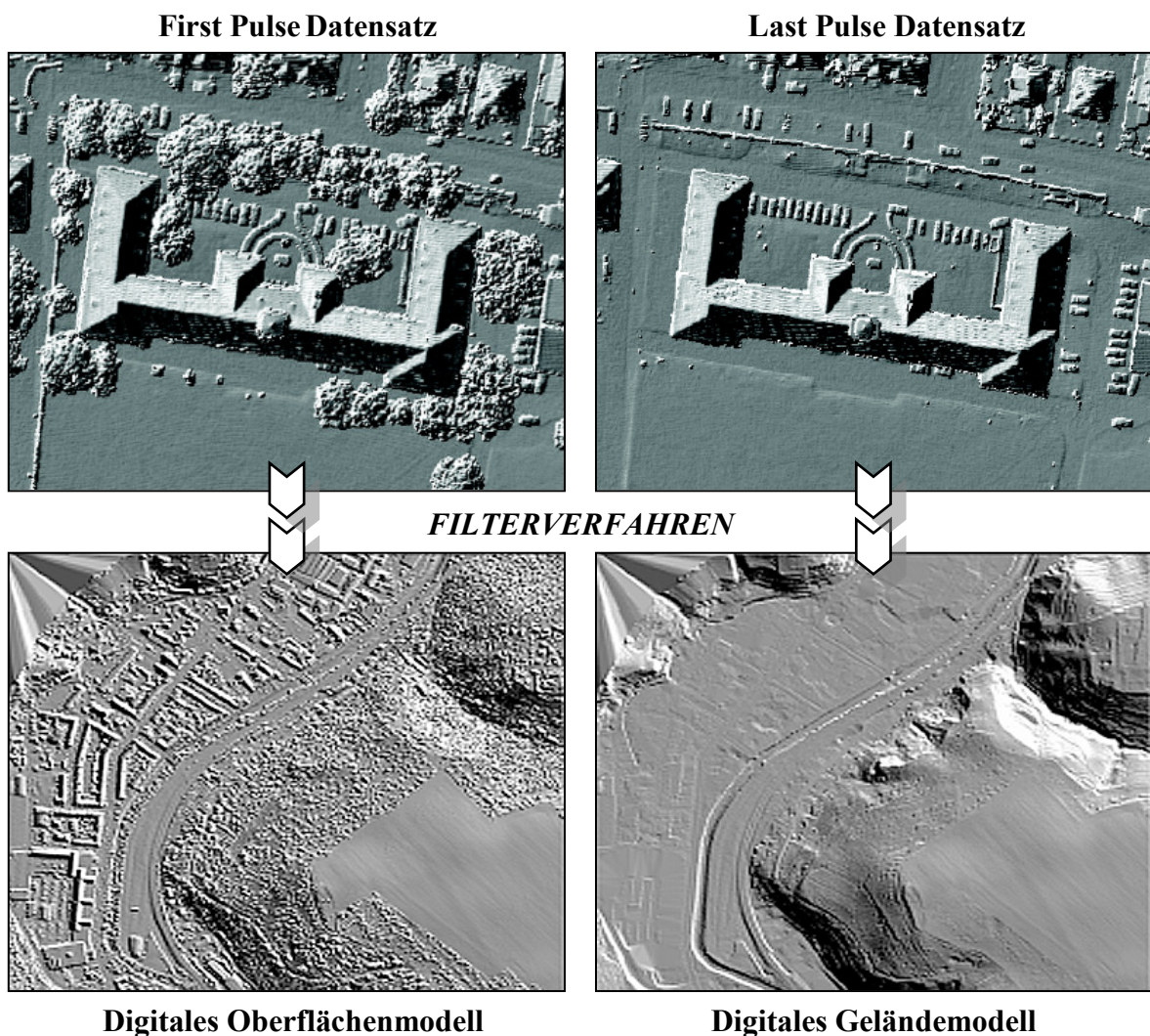
Filtermethoden

Speziell für die Ableitung eines DHMs sind nur die Bodenpunkte, also jene Messpunkte direkt auf der unbedeckten Erdoberfläche, von Interesse. Last Pulse-Reflexionen, die durch Objekte über der Erdoberfläche hervorgerufen wurden, müssen durch geeignete Filtermethoden entfernt werden [BRA-06]:

- Bei der Morphologischen Filterung wird die Höhe eines Punktes der Wolke in Bezug zu seinem Umfeld untersucht. Je größer dabei die horizontale Entfernung zu einem Nachbarn ausfällt, umso größer darf der Höhenunterschied sein, die Beschreibung dieser Funktion erfolgt über das sogenannte Strukturelement. Bei der Filterung wird

das Strukturelement unter jeden Messpunkt lagemäßig zentriert, danach erfolgt so lange eine vertikale Verschiebung nach oben bis ein Messpunkt berührt wird. Handelt es sich dabei nicht um den Punkt im Zentrum, so ist jener auch kein Bodenpunkt.

- Die Progressive TIN-Verdichtung erstellt auf Basis ausgesuchter, sicherer Bodenpunkte zuerst ein grobes TIN. Die Auswahl dieser primären Punkte erfolgt anhand der Einteilung des Aufnahmegebietes in große Bereiche, in denen der jeweils am niedrigsten liegende Punkt ausgewählt wird. Für jedes Dreieck wird anschließend aus den innerhalb liegenden Messpunkten ein weiterer Bodenpunkt ermittelt. Dazu wird die Länge und Neigung einer jeden Strecke (TIN-Eckpunkt – Messpunkt) berechnet, liegen diese unter bestimmten Schwellwerten, wird der Punkt als Bodenpunkt akzeptiert. Auf diese Weise wird die Vermaschung schrittweise verdichtet.



Quelle: in [HAA-04], [MAA-05]

Abb. 37: Laserscanning-Datensatz vor und nach der Filterung

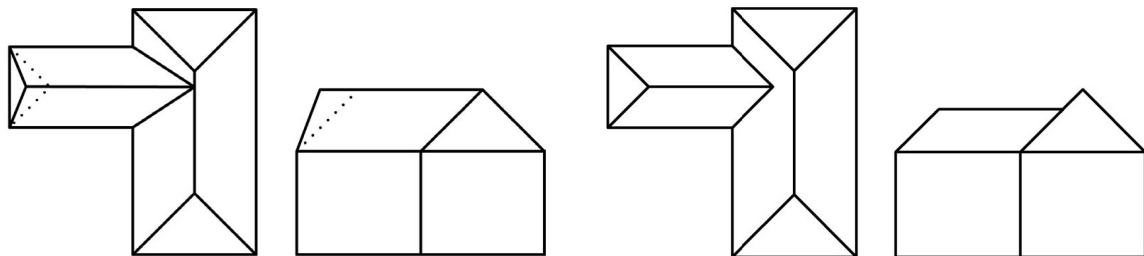
Die beim ALS erreichten Punktdichten liegen im Normalfall bei vier Punkten pro Quadratmeter, je höher die Abtastrate liegt, umso besser kommen auch kleine Dachformen wie Gauben zur Geltung, jedoch sind Detailobjekte wie Kamine nicht eindeutig auszumachen [DOR-08]. Dies ist damit zu begründen, da die Abtastung nicht selektiv auf einzelne formgebende Merkmale wie z.B. Eckpunkte ausgelegt ist, sondern quasi zufällig über das gesamte Objekt erfolgt. Durch diesen willkürlichen Vorgang ergibt sich weiters das Problem innerhalb einer solchen unstrukturierten (DSM-)Punktwolke gezielt Gebäude ausmachen zu können. Sofern dabei jedoch keine komplexen Grundriss- und Dachformen vorliegen gestaltet sich die Auswertung einer Punktwolke durch den Umstand, dass bereits dreidimensionale Koordinaten vorliegen, automatisierungsfreundlicher als eine photogrammetrische Auswertung. So lässt sich durch Verschnitt mit Gebäudegrundrissen des Katasters die Datenflut der Punktwolke größtenteils auf die zu erhebenden Dächer beschränken, ausgereifte Algorithmen (vgl. Kap. 3.4.2: S. 50) unterteilen diese dann in einzelne Dachflächen. Bei komplexen Dachkonstruktionen oder in Dachlandschaften ragende Störfaktoren (Bäume) scheitern vollautomatische Ansätze jedoch bis heute damit vollständige und genaue Auswertungen liefern zu können. Die notwendige manuelle Nachbearbeitung verschlingt den Vorteil der Automation damit mehr als zu Gänze [JAN-03].

3.2.3 Dachausmittlung

Ein komplett anderer Ansatz zur Gewinnung von Dachflächenmerkmalen besteht darin für einen gegebenen Gebäudeumriss auf geometrischem Wege ein passendes Dach zu ermitteln und aus diesem die erforderlichen Merkmale abzuleiten. Somit kann auf einfache Art und Weise auf kostspielige oder möglicherweise nicht verfügbare Datengrundlagen bzw. deren Auswertung verzichtet werden, natürlich im Wissen darüber, dass die so erzeugten Dachlandschaften auf Basis zwar gebräuchlicher, aber trotzdem rein hypothetischer Annahmen fußen.

Die Bestimmung der Dachflächen geschieht auf dieselbe Art und Weise wie sie auch konkret während der Planungsphase eines Gebäudes zum Einsatz kommt, durch Hilfe der Dachausmittlung. Man benötigt dazu Kenntnis über Grundriss, Dachform, Dachneigung, Stirnseite im Grundriss, etc., unübliche Dachformen und Grundrisse steigern dabei die Anzahl der erforderlichen Parameter. Da in diesem Fall mit Ausnahme des Grundrisses die weiteren Parameter in der Regel genauso wenig bekannt sind wie die zu erhebenden Dachflächenmerkmale selbst, müssen beim Entwurf der einzupassenden Dachflächen Verallgemeinerungen eingeführt werden. Dazu zählt die Vorannahme von gebräuchlichen Werten oder die Beschränkung auf exklusive Dachformen wie z.B. das Walmdach. Umso mehr der untersuchten Dächer von den grundsätzlich willkürlich festgelegten Alltagsnormen abweichen, desto geringer ist die Deckung zwischen den resultierenden Dachflächenmerkmalen und dem realen Sachverhalt. Die Bildung der Dachflächen kann für zwei unterschiedliche Dachvarianten (vgl. Abb. 38: S. 39) erfolgen, als Voraussetzung gilt, dass sich die Traufen des Gebäudes auf gleicher Höhe befinden müssen:

- In der ersten Version werden die Dachflächen so angelegt, dass der First über das gesamte Gebäude auf gleicher Höhe verläuft. Teilt sich das Gebäude in einen Haupt- und einen Nebentrakt und fallen dabei die Seitenlängen am Walm unterschiedlich aus, resultieren daraus ungleiche Dachneigungen. Dies wird optisch i.A. als wenig gefällig empfunden, als Gegenmaßnahme kann zumindest die Walmfläche des Nebentraktes neigungsmäßig an den Haupttrakt angepasst werden. Diese Variante ist in der Architektur eher verpönt und gilt als einfache, nicht stilvolle Lösung.
- Die zweite Version ist schwieriger zu konstruieren, was sowohl die Berechnung als auch die Umsetzung angeht. Die Variante sieht vor, dass die Dachneigung aller Dachflächen gleich ist und aus diesem Grund die Firsthöhen zwischen den einzelnen Dächern verschieden ausfallen können. Für eine Verbindung bei unterschiedlichen Höhen sorgt dann ein kurzes Stück Grat, die sogenannte Verwerfung.



Gleiche Firsthöhe, ungleiche Neigung

Ungleiche Firsthöhe, gleiche Neigung

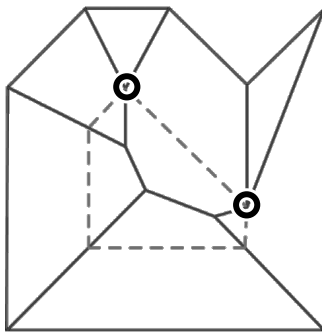
Quelle: in [JAN-07]

Abb. 38: Unterschiedliche Varianten der Dachausmittlung

Der Vorgang der Dachausmittlung ist eine Problemstellung aus der darstellenden Geometrie, Ziel ist die Ermittlung der Form, Lage, Neigung und Abgrenzung der einzelnen Dachflächen. Zur computergestützten Bestimmung der Dachflächen existieren verschiedene Verfahren (vgl. Kap. 3.4.3: S. 56), die anhand eines gegebenen Polygons des Gebäudegrundrisses eine Dachausmittlung durchführen. Je weniger Beschränkungen bezüglich der erlaubten Polygonform (orthogonal, konvex, ohne Löcher, etc.) gegeben sind, umso komplexer gestaltet sich dieser Vorgang. Der zurzeit bekannteste und robusteste Algorithmus, auf dem viele dieser Verfahren basieren, wurde 1995 von Aichholzer et al. vorgestellt und beschreibt eine Form der Darstellung von inneren Strukturen einfacher Polygone, auch kurz als Straight-Skeleton bezeichnet [JAN-07]. Folgend wird eine kurze Beschreibung dazu abgeliefert, für eine genauere Erläuterung sei auf [AIC-95] verwiesen.

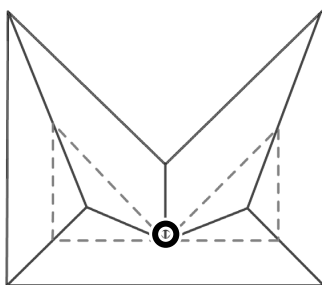
Straight-Skeleton

Der Algorithmus teilt das Innere eines n -eckigen Polygons in n monotone Polygone. Diese werden aus geraden Liniensegmenten gebildet, die entweder den Winkelsymmetralen des Polygons oder sich neu ergebender Kanten entsprechen.



Quelle: in [JAN-07]

Abb. 39: Edge Event



Quelle: in [JAN-07]

Abb. 40: Split Event

Alle Kanten des Polygons werden kontinuierlich parallel nach innen versetzt. Dabei wandern die Start- und Endpunkte einer Kante entlang der entsprechenden Winkelsymmetrale, wobei sie sich entweder voneinander entfernen oder annähern. Während diesem sogenannten Schrumpfprozess können zwei Ereignisse eintreten:

- Eine Kante schrumpft auf Länge 0 und löst sich dadurch auf. Die beiden Nachbarkanten grenzen nun aneinander (vgl. Abb. 39: S. 40).
- Eine Kante teilt sich in zwei einzelne Liniensegmente. Dieser Fall tritt infolge spitzer, (konvexer) Einschnitte im Polygon auf (vgl. Abb. 40: S. 40).

Durch jedes Ereignis entstehen ein oder zwei neue Polygone, die wieder dem soeben beschriebenen Vorgang unterzogen werden. Sobald sich alle Polygone im Zuge der Ereignisse aufgelöst haben, ergibt sich aus den Strecken entlang der Winkelsymmetralen das Straight-Skeleton [TER-01].

Die Dachausmittlung ist durch ihre vielen Einschränkungen und Vorannahmen zur Gewinnung von Dachflächenmerkmalen nur sehr beschränkt einsetzbar. Zwar besitzt sie das höchste Automatisierungspotenzial der in dieser Arbeit vorgestellten Auswertungsmethoden, inwieweit sich dabei die realen Dachkonstruktionen in den gewonnen Dachflächenmerkmalen widerspiegeln bleibt ungeklärt. Somit eignet sich diese Methode nicht, wenn hohe Detaillierungsgrade verlangt werden, steht jedoch einzig und allein eine plausible Wiedergabe von Dachlandschaften im Vordergrund, kann sie zur Anwendung kommen. In solchen Fällen kann die Dachausmittlung ihre Stärke ausspielen, da sie vollautomatisch und anhand einfacher Gebäudegrundrisse flächendeckende Resultate abliefert. Die Ergebnisse können dann als zusätzlicher Datensatz andere Auswertungsmethoden bei der Dachflächenmodellierung ergänzen, wie dies z.B. Brenner in [BRE-00] präsentiert.

3.3 Modelle für Dachflächen

Das Ziel der Dachflächenmodellierung ist die Überführung der unstrukturierten Dachflächenmerkmale in ein kompaktes Modell, das es erlaubt den Charakter der Form und die Topologie eines Daches dem Anwendungsbereich entsprechend abzubilden. Der Vorgang der Modellierung von Dachflächen ist dabei abhängig vom angewandten Verfahren und verläuft jeweils höchst unterschiedlich. Bevor im Anschluss (vgl. Kap. 3.4: S. 45) darauf eingegangen werden kann, muss das bisher nur sehr vage definierte Modell (vgl. Kap. 2.1.1: S. 5) dem soeben erwähnten Ziel entsprechend angepasst werden. Man hat im Zuge des Erstellungsprozesses allerdings nicht nur mit dem „einen Dachflächenmodell“ zu tun, sondern muss in den verschiedenen Stadien eines Verfahrens zwischen unterschiedlich ausgelegten Modellen unterscheiden, wie dies im Falle von verfahrens- und darstellungsbezogenem Modell gezeigt wird.

3.3.1 Verfahrensbezogenes Modell

Im Zuge eines jeden Verfahrens zur Erstellung von Dachflächenmodellen ergibt sich das verfahrensbezogene Modell, das intern zur Formulierung der Dachkonstruktion benötigt wird. Wie bereits erwähnt bestimmt der Einsatzzweck den notwendigen Grad der Übereinstimmung zwischen Abbild und Realität. In dieser Arbeit werden vier verschiedene Vertreter des verfahrensbezogenen Modelles vorgestellt, sie unterscheiden sich vor allem hinsichtlich der Grenzen ihrer Gestaltbarkeit und können in zwei Kategorien unterteilt werden (vgl. Abb. 41: S. 42).

Prototypenmodelle

Über einen Katalog stehen mehrere vordefinierte Dachprototypen für unterschiedliche Kombinationen aus Dachform (Sattel-, Walm-, Flachdach, etc.) und Grundriss zur Verfügung. Anhand der Dachflächenmerkmale eines Gebäudes erfolgen die Auswahl des bestpassendsten Prototyps und eine Anpassung der Eigenschaften (Positionierung, Orientierung und Skalierung) der Modellinstanz. Ein Vorteil – der auch als „model-driven“ oder modellbasiert bezeichneten – Modellkategorie ist, dass ihre Instanzen strukturell immer einwandfreie Dachflächenmodelle präsentieren, die auch bei niedrigen Abstraten an Dachflächenmerkmalen zu verlässlichen Ergebnissen führen. Die dafür ausschlaggebende Beschränkung auf eine begrenzte Anzahl vordefinierter Formgestalten ist aber zugleich ein signifikanter Nachteil, da komplexe Dachformen und Grundrisse, die nicht im Katalog enthalten sind, nur grob angenähert wiedergegeben werden können [DOR-08]. Folgende Modeltypen stellen Vertreter der Prototypenmodelle dar:

- Parametrisierte Modelle beschreiben wie bereits erwähnt die darzustellenden Dächer durch unterschiedliche Dachprototypen sowie einem dafür spezifischen Satz von Parametern. Damit erfolgt eine Anpassung in Länge, Breite, Höhe und Dachneigung.

Dieser Modelltyp hat sich z.B. bei der Erfassung von Vorortsiedlungen mit einheitlichen oder zumindest beschränkten Dachkonstruktionen bewährt.

- Konstruktive Komponentenmodelle ermöglichen die Modellierung von Dächern durch wohldefinierte Kombination von parametrisierten Modellen. Somit lassen sich auch Dachkonstruktionen abbilden deren Grundrisse zu ungewöhnlich sind um sie direkt in den Katalog aufzunehmen [STE-00]. Grundsätzlich stellt diese Herangehensweise einen robusten Ansatz dar, der jedoch an komplexen Grundrissen bzw. den daraus resultierenden Dachkonstruktionen scheitern kann, wenn die zur Bildung benötigten Dachformen nicht im Katalog enthalten sind [WAC-03].

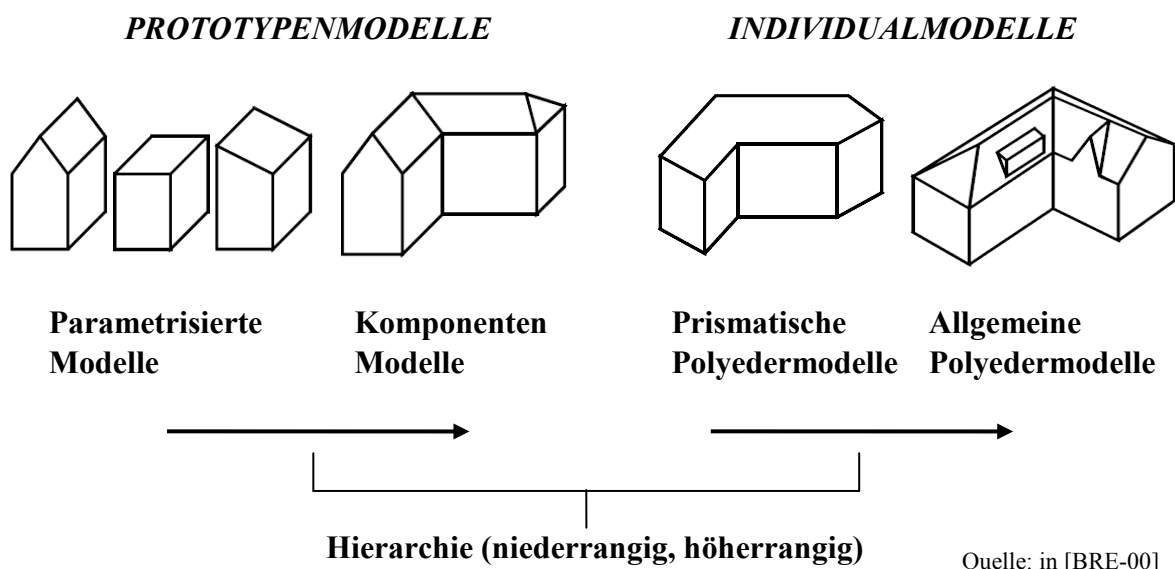


Abb. 41: Kategorisierung der Vertreter des verfahrensbezogenen Modells

Individualmodelle

Es wird versucht aus der Gesamtmenge der Dachflächenmerkmale Teilmengen mit gewissen homogenen Eigenschaften zu detektieren um diese durch eine kompakte, mathematische Formulierung zu ersetzen. Zum Einsatz kommen dabei meist Analyseverfahren, die anhand bestimmter Indikatoren möglichst koplanare Merkmalsanhäufungen suchen um in diese Ebenen einzupassen. Durch Verschneidung oder Vereinigung der das Dach repräsentierenden Ebenen lassen sich Dachkanten und in weiterer Folge Dachflächen ermitteln, dies kann zur Bildung von bestimmten darstellungsbezogenen Modellformen (vgl. Kap. 3.3.2: S. 43) eingesetzt werden. Durch die Möglichkeit einzelne Dachflächen individuell modellieren zu können eignet sich die auch als „data-driven“ bzw. datenbasiert bezeichnete Modellkategorie dazu komplexe Dachkonstruktionen abzubilden [BRA-06], [WAC-03]. Je detaillierter allerdings die abzubildenden Objekte ausfallen, umso dichter müssen die Dachflächenmerkmale vorliegen und umso größer wird die Gefahr von strukturellen Modellierungsfehlern, die einen zeitaufwändigen Überprüfungsprozess nach sich ziehen [JAN-03]. Folgende Modelltypen stellen Vertreter der Individualmodelle dar:

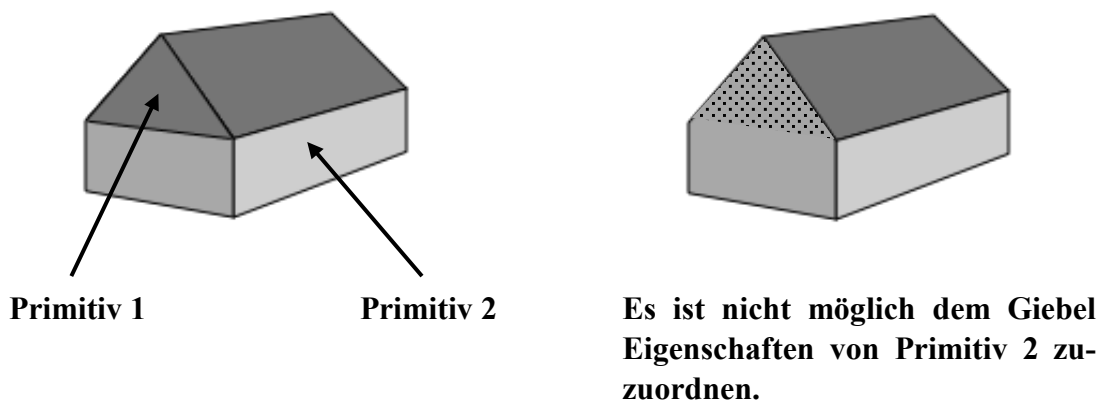
- Der Einsatz prismatischer Polyedermodelle bietet sich an, wenn die Abbildung mittels konstruktiver Komponentenmodelle aufgrund komplizierter Grundrissformen nicht zielführend erscheint. Sie erlauben die Bildung polygonaler Grundrisse außerhalb jeglicher Vorgaben durch Kataloge, beschränken sich aber ausschließlich auf die Dachform Flachdach. Dieser Modelltyp wurde vorwiegend in den USA erprobt, wo er sich in Hochhausszenarien oder industriellen Flachbautenarealen bewährt hat.
- Als Weiterentwicklung des oben genannten Modelltyps können allgemeine Polyedermodelle gesehen werden. Die dabei ermittelten Ebenen sind bestmöglich an die abzubildende Dachkonstruktion angepasst, was sowohl für Grundriss als auch die Dachform gilt [STE-00].

3.3.2 Darstellungsbezogenes Modell

Ist für das Dachflächenmodell eine graphische Ausgabe geplant, wie dies z.B. für den gesamten Anwendungsbereich der Visualisierung gilt, muss zusätzlich ein darstellungsbezogenes Modell zum Einsatz kommen. Um den reibungslosen Ablauf einer späteren Darstellung zu gewährleisten hat dieses den gängigen Darstellungsschemata der Computergraphik zu gehorchen, wovon in dieser Arbeit zwei Vertreter angeführt werden.

Constructive Solid Geometry

Die Konstruktive Festkörpergeometrie oder kurz CSG genannte Darstellungsform ermöglicht Volumenkörper zu konstruieren, indem vordefinierte, parametrisierbare Grundelemente über boolesche Algebra miteinander kombiniert werden. Bei den Grundelementen, den Primitiva, handelt es sich um eine bestimmte Anzahl an Körpern, deren Oberflächen relativ einfache mathematische Formulierungen erlauben, wie z. B. Würfel, Zylinder, Prismen, Pyramiden, Kugeln oder Ringe. Die darzustellenden Objekte werden durch Auswahl geeigneter Grundelemente und boolescher Operationen wie Vereinigung (Union), Schnitt (Intersection) oder Differenz (Difference) gebildet [WIK-09b]. Im Falle von Dachflächen ergibt sich beim Einsatz von CSG der Vorteil, dass die Primitiva implizit geometrische Relationen wie Parallelität oder Orthogonalität enthalten. Als Nachteil stellt sich allerdings die fehlende Möglichkeit der Bezugnahme auf einzelne Ebenen des Körpers dar. Darstellungseigenschaften werden somit dem gesamten Volumenkörper zugeordnet, was nicht immer wünschenswert ist (vgl. Abb. 42: S. 44).



Quelle: ergänzt nach [WIK-09c]

Abb. 42: Probleme bei der Zuweisung von Eigenschaften in CSG-Modellen

Boundary Representation

Die Randdarstellung oder kurz B-Rep genannte Darstellungsform beschreibt Flächen- oder Volumenmodelle anhand ihrer begrenzenden Oberflächen. Die Definition der Modelle erfolgt mittels der drei Elemente Knoten (nodes), Kanten (edges) und Flächen (faces). Die Geometrie wird hierbei durch die Koordinaten der Knoten bestimmt, die Topologie durch die Beziehungen der Elemente zueinander. Kanten werden dabei jeweils durch zwei Knoten gebildet, mindestens drei Kanten bilden bei geschlossenem Verlauf eine Fläche und diese formen Flächen- oder Volumenmodelle [WIK-09a]. Bei so erzeugten Dachflächenmodellen ist darauf zu achten, dass die Flächen eine geschlossene, durchdringungsfreie Oberfläche bilden, dies ist für spätere Visualisierungen oder Analysen von Bedeutung. Ein Nachteil von B-Rep ist die schwierige Überprüfbarkeit dieser Eigenschaft sowie die im Vergleich zu CSG nicht gegebene Kompaktheit der Modelldefinition. Als Vorteil ergibt sich die Möglichkeit der Bezugnahme auf einzelne Flächen, was mittels CSG nicht möglich ist. Es ist anzumerken, dass Echtzeit-3D-Rendermethoden dieses Darstellungsschema sehr effektiv ausgeben können, wohingegen eine Ausgabe von CSG-Modellen meist gar nicht direkt möglich ist. Dazu ist erst eine Transformation in ein anderes Schema erforderlich [WIK-09d].

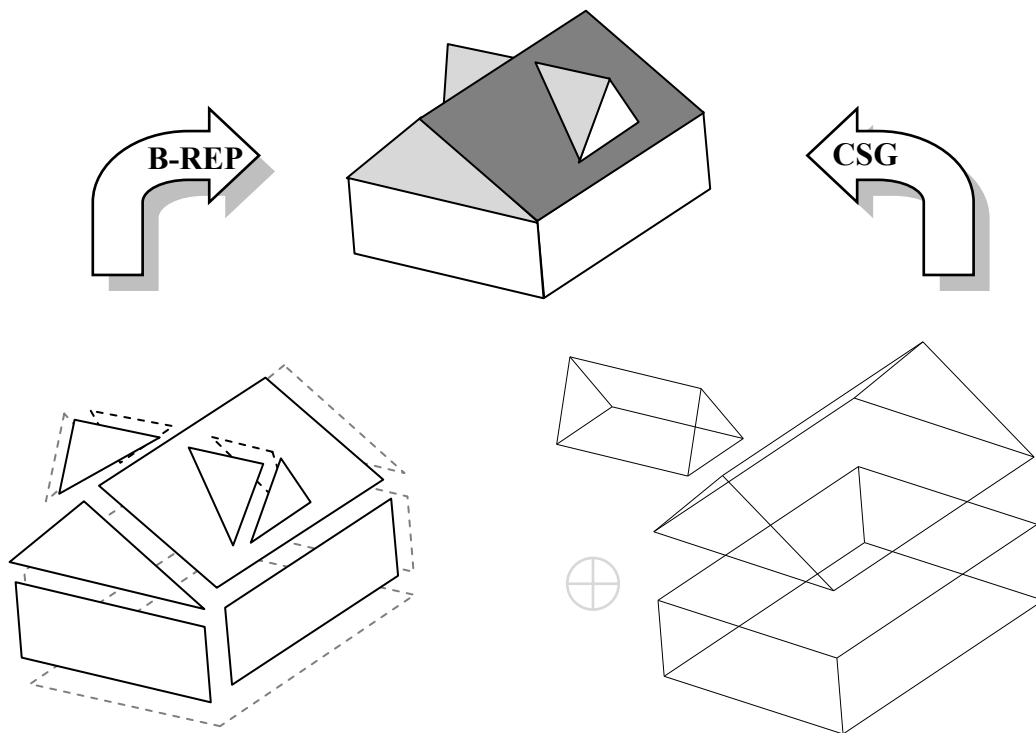


Abb. 43: Darstellungsschemata des darstellungsbezogenen Modelles

3.4 Verfahren zur Modellerstellung

Es werden ausgewählte Verfahren zur Erstellung von Gebäudemodellen präsentiert, die verschiedene manuelle aber auch teilweise automatisierte Techniken zur Auswertung und Modellierung einsetzen. Bei der Auswahl lag das Hauptaugenmerk darauf möglichst unterschiedliche Verfahrensansätze abzudecken, die in Modellen unterschiedlicher Detaillierungsgrade bzw. Nachbearbeitungsaufwand resultieren.

3.4.1 Photogrammetrie und Prototypen-/Polyedermodell

Rottensteiner stellt in [ROT-01] ein photogrammetriebasiertes Verfahren zur halbautomatischen Erstellung dreidimensionaler Gebäudemodelle aus Luftbildern (und deren Orientierungsparameter) vor. Durch die hohe räumliche Auflösung des Ausgangsmaterials (Datengrundlage des Evaluierungsprojektes: Maßstab 1:4500, Kammerkonstante 15 cm, Digitalisierungsintervall 15 μm) ist die Basis für Auswertungen gelegt, die auch hohen Ansprüchen der 3D-Stadtmodellierung genügen. Wie der Autor im Text anmerkt, können allerdings aufgrund der praktisch unendlichen Anzahl an Gebäudeausprägungen bis heute nur halbautomatische Methoden der Gebäudeextraktion verlässliche Ergebnisse liefern. Als halbautomatisch, wozu auch dieses Verfahren zu

zählen ist, werden dabei Methoden bezeichnet, die im Zuge ihrer Durchführung auf einzelne menschliche Eingriffe angewiesen sind. Meist handelt es sich dabei um programmkritische Auswahlsschritte, die nach wie vor vom Mensch besser gelöst werden können als mittels maschineller Bearbeitung – etwa die Interpretation von Strukturen, Formen oder Texturen [STE-06]. So erfolgen bei diesem Verfahren sowohl die Auswahl der unterschiedlich formgestalteten Gebäudeteile als auch deren grobe Justierung durch manuelle visuelle Interpretation von Luftbildern. Der Rest des Verfahrens wird automatisiert durchgeführt. Dazu zählen die Aggregation der Gebäudeteile zu Gebäuden, die Umwandlung in die Randflächendarstellung zur Visualisierung und die Feinjustierung einzelner Gebäudeflächen durch Mittel der Bildanalyse.

Das Verfahren wird als Softwaremodul auf einer digitalen photogrammetrischen Auswertestation durchgeführt. Um ein Gebäudemodell zu erstellen stehen dem Benutzer über einem Katalog unterschiedliche, parametrisierbare Primitive zur Auswahl, die es bestmöglich in das Untersuchungsobjekt einzupassen gilt (vgl. Abb. 44: S. 46). Dies erfordert die Positionierung, Orientierung und Skalierung, wodurch sich für jeden Gebäudeteil folgende Parameter der Justierung ergeben:

- Referenzpunkt: Gibt die Position des Einsetzpunktes des Primitives an.
- Rotation um die Z-Achse: Passt die anfangs willkürliche Orientierung des Primitives dem realen Sachverhalt an.
- Bestimmung der Parameter der Ebenengleichungen: Passt die anfangs willkürliche Skalierung des Primitives dem realen Sachverhalt an.



Quelle: ergänzt nach [ROT-01]

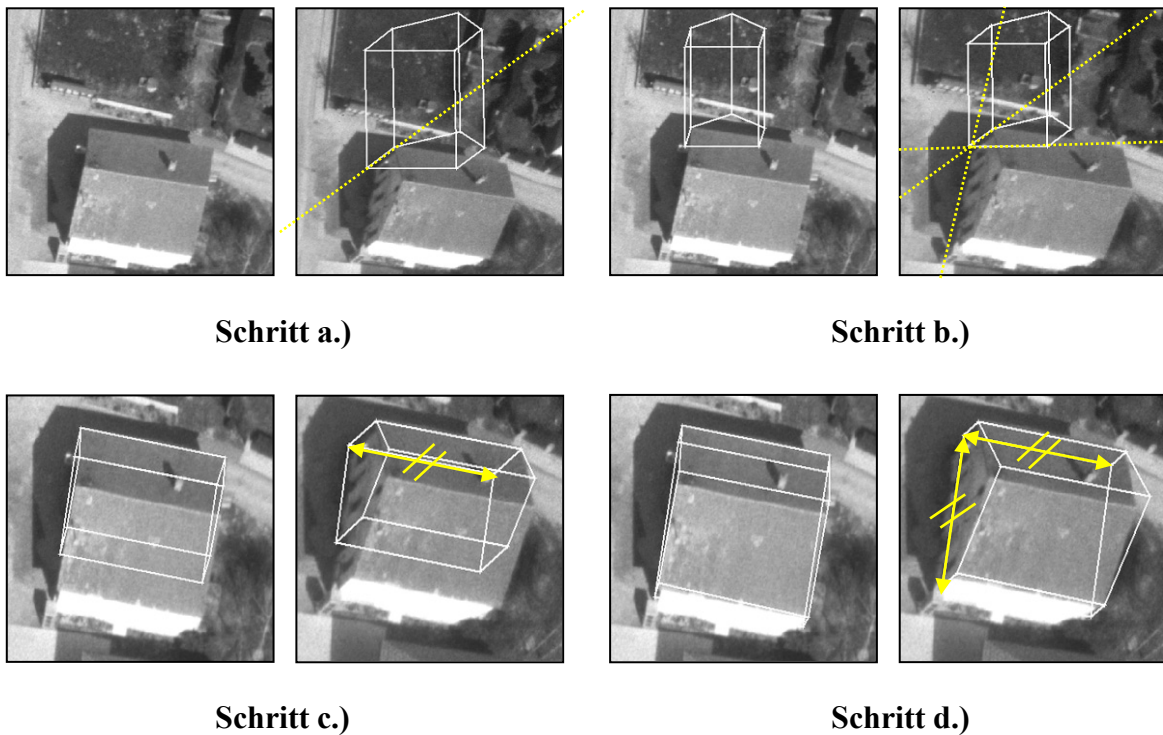
Abb. 44: Kombination dreier Gebäudeprimitive zum einem Gebäudemodell

Die dem Benutzer als parametrisierte Modelltypen präsentierten Primitive sind anwendungsintern als Polyedermodelle definiert und erlauben somit einen größeren Spielraum bei der Formgestaltung. Durch eine geschickt gewählte mathematische Formulierung der formbeschreibenden Ebenen kann auch bei diesem Modelltyp die gewünschte kompakte Formulierung erreicht und implizit Eigenschaften wie Parallelität und Orthogonalität eingeführt werden. Folgende Parameter dienen zur Beschreibung der Primitive:

- Aufstellung der am Modell beteiligten Knoten, Kanten und Ebenen sowie deren topologische Beziehungen.
- Durch direkte Angabe von Parameterwerten oder mittels Referenzierung bestehender Parameterwerte (und Spiegelmatrizen) werden die Ebenen definiert. Durch Verschneidung dreier Ebenen ist indirekt eine geometrische Bestimmung der Knoten möglich.

Anhand eines einfachen Gebäudes mit rechteckigem Grundriss und Satteldach wird nun die halbautomatische Verfahrensweise zur Erstellung eines Gebäude- bzw. Dachflächenmodelles demonstriert, dabei wird angenommen, dass der Benutzer bereits ein passendes Primitiv für das zu bearbeitende Gebäude gewählt hat. In einem iterativen Vorgang erfolgt eine manuelle photogrammetrische Auswertung (vgl. Kap. 3.2.1: S. 32), bei der in einem Bilderpaar die Gebäudeecken als Erhebungsmerkmale zu identifizieren sind – dabei ist anzumerken, dass die Betrachtung hierbei nicht stereoskopisch erfolgt. Mittels der statistischen Methode der robusten Schätzung erfolgt anhand dieser Merkmale bereits automatisch eine Anpassung der Parameter der Justierung des verfahrensbezogenen Modelles (vgl. Kap. 3.3.1: S. 41). Die schrittweise Annäherung des Primitives an das Gebäude wird über ein darstellungsbezogenes B-Rep Modell (vgl. Kap. 3.3.2: S. 43) graphisch ins Luftbild eingeblendet. Die Prozedur wird so lange wiederholt, bis der Operateur aufgrund der visuellen Beurteilung entscheidet, dass das Gebäude dem Anwendungszweck entsprechend modelliert ist. Der genaue Ablauf dieser sogenannten Grobjustierung des Modelles (vgl. Abb. 45: S. 48) wird im Folgenden näher erläutert:

- a. Im rechten Bild konnte bereits im Vorfeld eine Gebäudeecke identifiziert werden. Durch Kenntnis dieser Bildkoordinaten befindet sich der dazugehörige Modelleckpunkt bereits planimetrisch (X/Y-Achse) an Position. Der Höhenwert kann allerdings noch nicht ermittelt werden und befindet sich irgendwo entlang der Z-Achse.
- b. Da inzwischen im linken Bild dieselbe Gebäudeecke ebenfalls identifiziert wurde, kann aus dem Schnittpunkt der beiden Betrachtungen die dreidimensionale Position des Modellpunktes berechnet werden.
- c. Durch Identifizierung einer weiteren Gebäudeecke lassen sich die Orientierung sowie eine der drei notwendigen Skalierungen herstellen.
- d. Die nächste Skalierung kann in Folge durch Identifikation einer dritten Gebäudeecke bestimmt werden. Die letzte Anpassung des Modelles, die noch ausstehende dritte Skalierung, wird im Zuge der Demonstration der Feinjustierung vorgenommen.



Quelle: ergänzt nach [ROT-01]

Abb. 45: Grobe Anpassung des Modelles mittels photogrammetrischer Auswertung.

Mittels manueller Auswertung können die Parameter der Justierung grundsätzlich nur grob angenähert bestimmt werden, das Verfahren bietet aber die Möglichkeit anhand dieser Grundlage eine automatisierte Feinjustierung des Modelles durchzuführen. Als Datengrundlage dienen Bildpyramiden, die aus den Luftbildpaaren erstellt und im Zuge der automatischen Auswertung mittels Methoden der Bildanalyse schrittweise analysiert werden. Ausgehend vom niedrigsten Auflösungslevel wird versucht die Dachkanten des Gebäudemodell den aus Bildern extrahierten Kanten zuzuordnen und bei Erfolg anzugleichen. Die Zuordnungshypothese fußt auf Basis zweier Bedingungen (vgl. Abb. 46: S. 49):

- Ein Segment s der Bildkante l wird dann der Dachkante e zugeordnet, wenn mindestens einer seiner Endpunkte innerhalb eines gewissen Puffers um die Dachkante liegt und
- der Winkel zwischen den Vektornormalen von s und e einen bestimmten Schwellwert nicht überschreitet.

Als Ergebnis erhält man eine der Auflösung des jeweiligen Pyramidenniveaus entsprechende Verbesserung der Justierungsparameter und gleichzeitig die Näherung für den nächsten Zuordnungsdurchgang. Diese Prozedur wird solange wiederholt, bis die höchste Auflösungsstufe erreicht ist. Die hierarchische Vorgehensweise vom niedrigsten zum höchsten Pyramidenniveau wird eingesetzt um ausgehend vom vorgegebenen Bereich

der Grobjustierung den Suchradius beschränkt halten zu können, da in den hochfrequenten, höheren Pyramidenstufen zu viele ablenkende Bildkanten hervortreten.

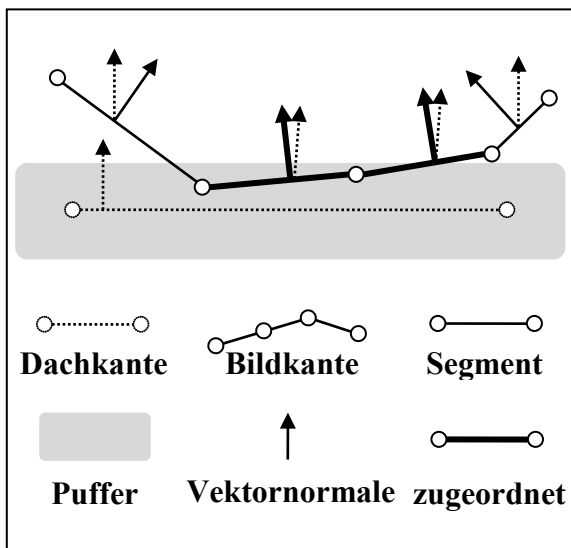


Abb. 46: Darstellung der Zuordnungshypothesen

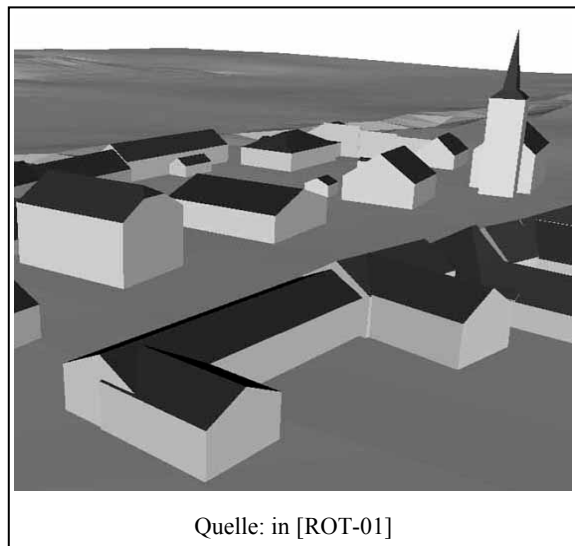


Abb. 47: Gebäudemodelle, erstellt mittels eines photogrammetriebasierten Verfahrens

Anhand der Erfahrungen, die durch das Evaluierungsprojekt (ländlicher Dorfkern) gesammelt werden konnten, merkt Rottensteiner im Schlusstext an:

- Als kritisch für den Erfolg der automatischen Feinjustierung haben sich Verschattungen und fehlende Kontraste im Bildmaterial herausgestellt, jedoch soll angemerkt sein, dass zur Auswertung keine Farbbilder herangezogen wurden.
- Im Zuge der photogrammetrischen Auswertung hat sich die fehlende stereoskopische Betrachtungsmöglichkeit erschwerend bei der Auswahl und Justierung der Gebäudeprimitive ausgewirkt.

Es wurde ein Genauigkeitsvergleich zwischen einer manuellen und einer automatisch durchgeführten Feinmessung angestellt, bei dem die Differenzen der Parameter der Justierung ermittelt wurden. Der mittlere Fehler lag demnach bei $\pm 3,1$ cm in der Positionierung, ± 85 mgon in der Orientierung und $\pm 2,9$ cm in horizontaler bzw. 2,8 cm in vertikaler Skalierung. Die Ergebnisse zeigen das hohe Genauigkeitspotential beim Einsatz dieser, die manuellen Messungen ergänzenden, Automatisierungsmethode. Sie ermöglicht eine große Beschleunigung des Erstellungsprozesses und kann somit als der hervorstechende Faktor des Verfahrens gesehen werden. Die im Verfahren eingesetzten prototypenhaften Gebäudeteile sind, durch deren Umsetzung als Polyedermodelle (vgl. Abb. 47: S. 49), beliebig aggregierbar und erlauben somit die Abbildung einer breiten Palette an Gebäudegrundrissen. U.U. machen jedoch ungewöhnliche Dachkonstruktionen eine Anpassung der Primitive des Kataloges erforderlich oder aber behindern gar eine adäquate Abbildung des Daches eines Gebäudes.

3.4.2 Laserscanner-Auswertung und Polyedermodell

Dorninger und Pfeifer präsentieren in [DOR-08] ein weitgehend autonom ablaufendes Verfahren zur Erstellung dreidimensionaler Gebäudemodelle mittels Analyse von ALS-Erhebungen. Zum Einsatz kommen dabei hochaufgelöste Daten von bis zu zehn Punkten pro m² (Datengrundlage des Evaluierungsprojektes: sechs – zehn Punkte pro m²), womit auch die Ausrichtung des Verfahrens auf präzise Gebäudemodellierungen unterstrichen wird. Entgegen der Arbeitsweise vieler anderer ALS-basierter Verfahren zur Gebäudeauswertung wird nicht mit einem aus der Punktwolke abgeleitetem DOM, sondern mit der Wolke selbst operiert. Durch den Verzicht auf das regelmäßige Raster muss zwar explizit die Nachbarschaft der Messpunkte definiert werden, im Gegenzug bleiben aber charakteristische Details (eckige Strukturen) der Abtastungen erhalten.

Das Verfahren versucht schrittweise ein Gebäude nach dem anderen zu erstellen. Jeder Durchlauf beginnt damit, dass aus der Punktwolke ein Bereich grob auszuwählen ist, der das gewünschte Gebäude komplett einschließt. Laut den Autoren handelt es sich dabei um einen verfahrenskritischen Schritt, der manuell durchgeführt werden sollte um bestmögliche Endresultate zu erzielen. Der selektierte Ausschnitt enthält neben den Messpunkten des Gebäudes natürlich auch Messpunkte anderer, sich in diesem Bereich befindlicher, Objekte. Um in den weiteren Prozessschritten auf diese Störfaktoren eingehen zu können muss in einem Auswertevorgang eine Segmentierung der unstrukturierten Punktwolke hinsichtlich dieser Objekte erfolgen:

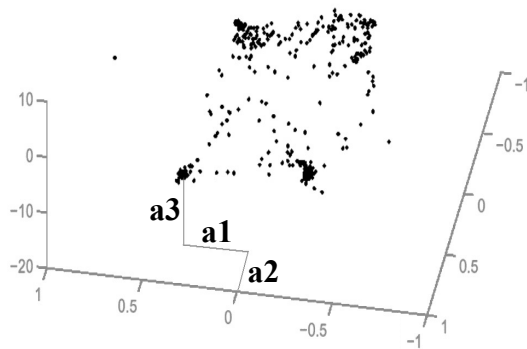
- Geländereflexionen lassen sich auffinden, indem mittels Filtermethoden aus der Punktwolke ein DHM gebildet wird, das zur Normalisierung der Höhenwerte (nDSM) innerhalb der Wolke herangezogen werden kann (vgl. Kap. 3.2.2: S. 35). Ein gewisser Schwellenwert definiert alsdann Punkte in Bodennähe, womit eine Segmentierung der Geländepunkte gebildet werden kann.
- Reflexionen anderer Gebäude(teile) können durch den sogenannten „Mean Shift-Algorithmus“ erkannt werden. Dieser versetzt die in einer Wolke annähernd regelmäßig verteilten Punkte in die Zentren, einer um jeden Punkt neu zu bestimmenden Nachbarschaft. So löst sich die Wolke schrittweise auf und es kommt zur Clusterbildung, welche zur Segmentierung logisch zusammengehöriger Objekte herangezogen werden kann.
- Reflexionen, hervorgerufen durch freistehende oder in Gebäude ragende Vegetation, können infolge von variierender Oberflächenrauheit jener Flächen erkannt werden, die sich aus benachbarten Punktansammlungen ergeben. Somit erfolgt eine Segmentierung der Wolke auf Basis koplanarer Punktnachbarschaften.

Die Verfahrensweise des letztgenannten Segmentierungsalgorithmus wird nun einer eingehenden Betrachtung unterzogen. Es gilt die Annahme, dass Punkte, die innerhalb der Wolke einen koplanaren Bereich bilden, jeweils die gleiche lokale Regressionsebene teilen. Um solche Regionen innerhalb der Wolke zu finden, ist es nötig fortan jeden Punkt

eine ihm spezifische Regressionskurve zuzuteilen, die entsprechend der Parameterform der Ebene definiert ist:

$$0 = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 z \quad (3)$$

Dabei entspricht $(a_1, a_2, a_3)^T$ dem Normaleneinheitsvektor jener Ebene, welche durch eine den Punkt umgebende Nachbarschaft (Richtwert: 8 – 32 Punkte) gebildet wird, während a_0 die Normaldistanz der Ebene zum Koordinatenursprung bezeichnet.



Quelle: in [JAN-03]

Abb. 48: Clusterbildung im dreidimensionalen Merkmalsraum.

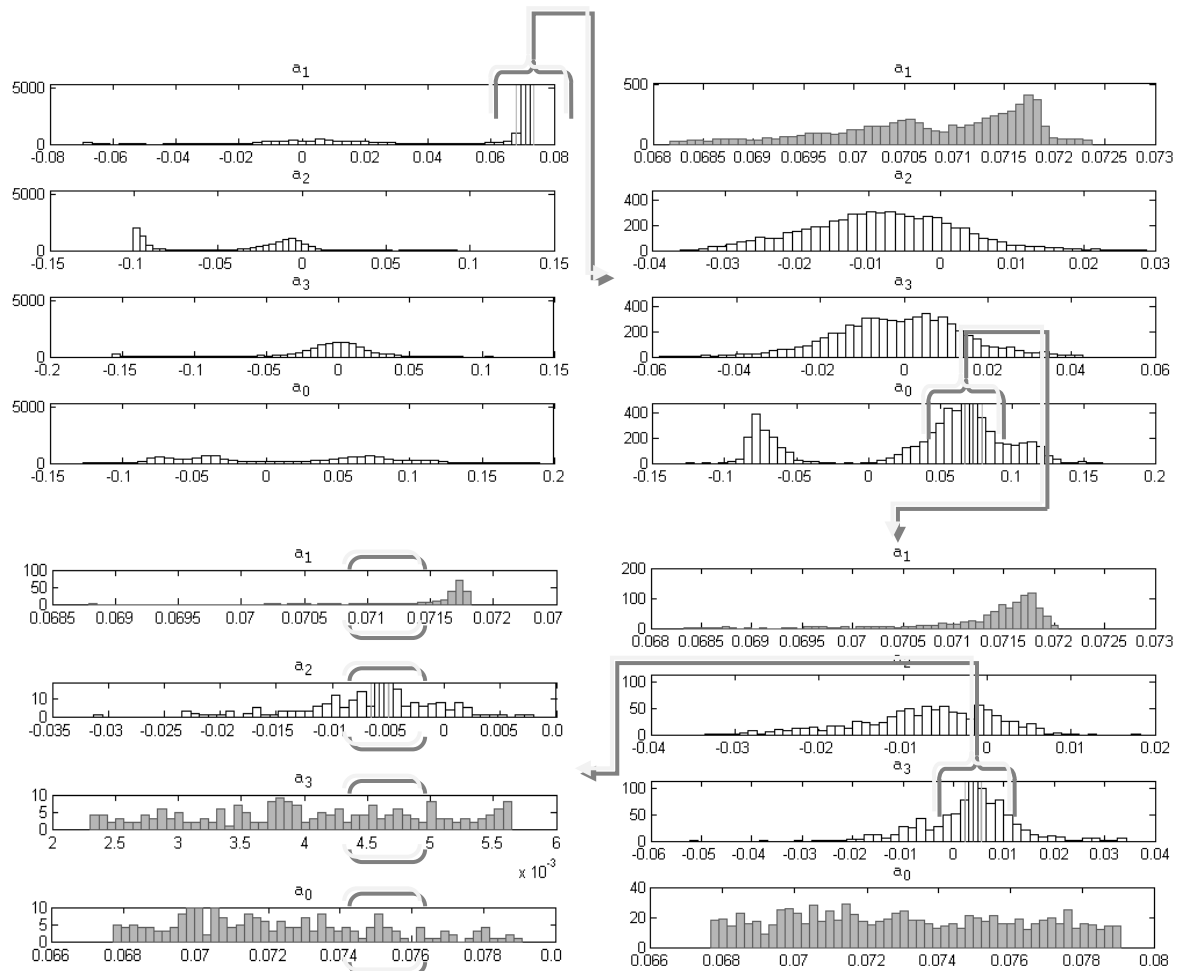
Um anhand dieser Angaben eine Segmentierung der Wolke in koplanare Ebenen durchzuführen werden für jeden Punkt die drei letztgenannten Ebenenparameter ermittelt. Die Werte werden als dreidimensionale Positionsangaben innerhalb eines kartesischen Koordinatensystems interpretiert, sodass jeder Punkt der Wolke einen Eintrag in diesem Merkmalsraum findet (vgl. Abb. 48: S. 51). Treten Einträge gehäuft auf, deutet dies im Objektraum auf eine vermehrte Anzahl von Punkten mit denselben Normaleinheitsvektoren hin.

Es bedarf allerdings noch einer Betrachtung der Distanzen im Objektraum um festzustellen, welche dieser Punkte eine zusammenhängende, koplanare Ebene innerhalb der Wolke bilden. Die Autoren weisen darauf hin, dass eine gleichzeitige Einbeziehung aller Punkte der Wolke in die Distanzprüfung zu einer rasant ansteigenden Zeitkomplexität $O(n^2)$ führt. Es ist daher erforderlich mittels einer Vorauswahl die Anzahl jene Punkte zu beschränken, die der Prüfung unterzogen werden. An einer auf Geländepunkte und Fremdgebäude segmentierten Punktwolke soll nun eine Clusterbildung mit anschließender Distanzprüfung demonstriert werden:

- Anstelle der gemeinsamen Betrachtung der Parameter innerhalb eines mehrdimensionalen Merkmalsraumes erfolgt eine getrennte Analyse auf Basis eindimensionaler Merkmalsräume (vgl. Abb. 49: S. 52). Ein jedes dieser Histogramme umfasst dabei einen diskreten, 100stelligen Wertebereich, worin für jeden Punkt der Wolke einer seiner Parameterwerte eingetragen wird.
- Zur Bildung des ersten koplanaren Segmentes der Punktwolke soll der ausgeprägteste Parametercluster ermittelt werden. Dazu wird über alle Histogramme hinweg nach dem dominantesten Modalwert gesucht. Konnte dieser in einem Histogramm ausgemacht werden, wird für jene Punkte, die diesem Parameterwert zugeordnet sind, die Suche erneut durchgeführt, diesmal allerdings auf die restlichen Histogramme eingeschränkt. Der Vorgang wird so lange wiederholt, bis es keine verbleibenden Histogramme mehr gibt. Konnte kein Wert ermittelt werden, wird die

Auflösung des Wertebereiches der Histogramme halbiert und die Suche erneut gestartet.

- c. Es wird eine Ebene aus jenen Punkte gebildet, die dem soeben beschriebenen Parametercluster zugeordnet sind. Die Distanzprüfung zur Ebene findet anschließend für Punkte innerhalb einer gewissen Nachbarschaft, sowohl im Merkmals- als auch Objektraum, statt (vgl. Abb. 50: S. 53). Dabei akzeptierte Punkte werden in das Segment der Punkte des initialen Parameterclusters aufgenommen und dienen zur Adaption der Ebene. In wiederholenden Vorgängen des Schrittes c.) wird so lange eine Ausweitung der Nachbarschaft vorgenommen, bis es zur Überschreitung einer definierten Distanzschwelle kommt. Das Verfahren wird dann mit Schritt b.) fortgesetzt, wo innerhalb des noch unsegmentierten Teiles der Punktwolke zu einer erneuten Suche eines Parameterclusters angesetzt wird. Diese iterativen Vorgänge bewirken so lange eine Segmentierung der Wolke in koplanare Bereiche bis jeder Punkt einem Segment zugeordnet ist.



Quelle: ergänzt nach [DOR-08]

Abb. 49: Ablauf der Clusterbildung in getrennten, eindimensionalen Merkmalsräumen

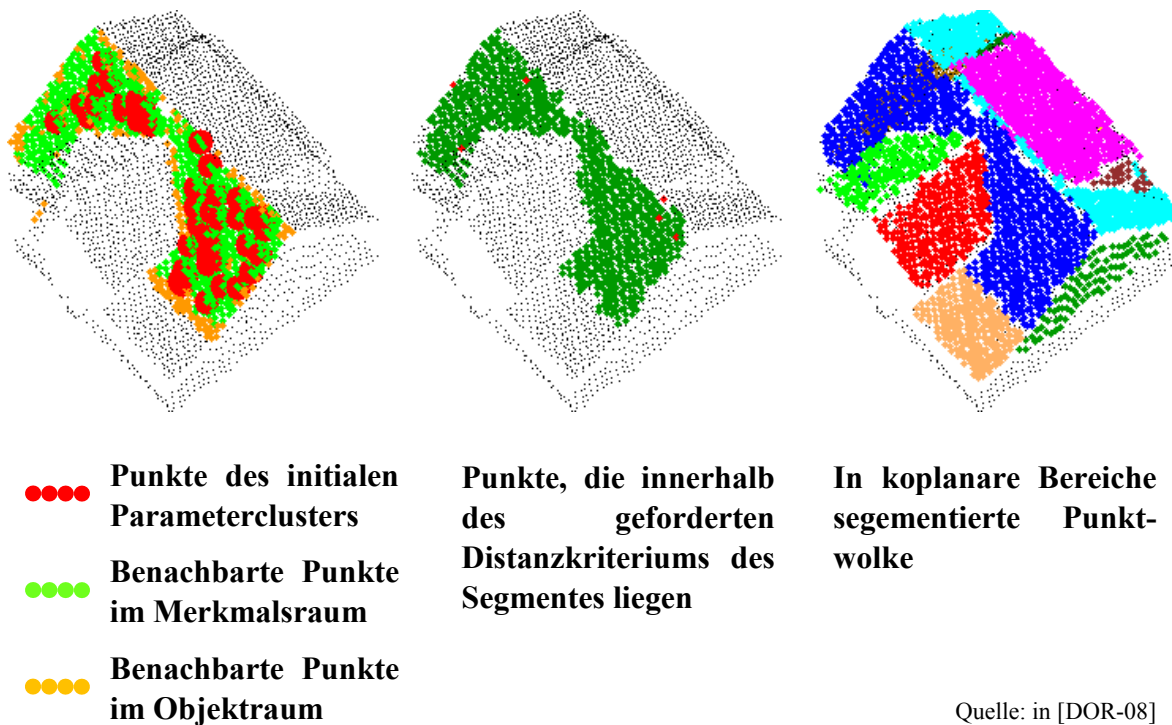
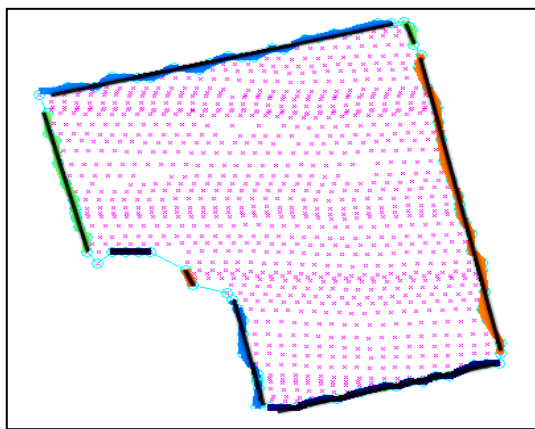
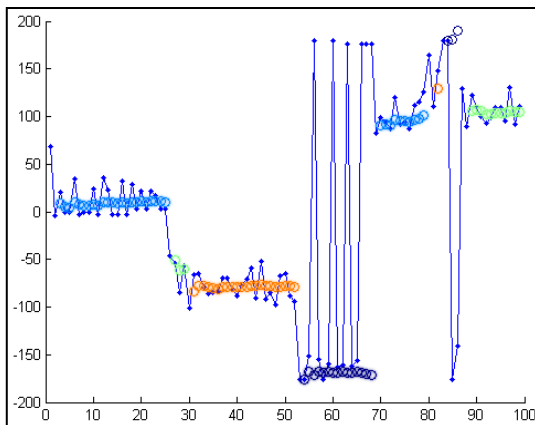


Abb. 50: Verschiedene Stadien der Segmentierung koplanarer Bereiche einer Punktwolke

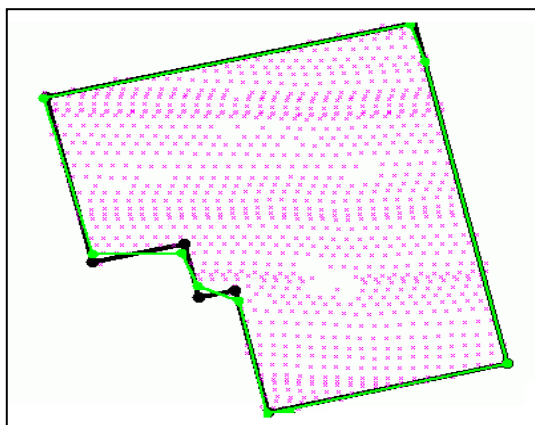
Sobald die Segmentierung der Störfaktoren und der Dachflächen abgeschlossen wurde, kann mit dem Prozess der Modellierung begonnen werden. Die Durchführung setzt die Kenntnis des Gebäudegrundrisses voraus, weshalb zuallererst aus den nur unscharf abgegrenzten Dachflächensegmenten eines Gebäudes ein generalisiertes, orthogonales Polygon des Umrisses erstellt werden muss. Dazu werden die Punkte dieser Segmente in die xy -Ebene projiziert, durch anschließende Bildung des 2D Alpha-Shapes wird eine scharfe, polygonale Begrenzung dieser Punktmenge ermittelt. Als Richtwert für die Wahl des Alpha-Wertes geben die Autoren den zweifachen mittleren Punktabstand an, größere Werte führen z.B. im Fall I-förmiger Grundrisse zu verfälschenden, konvexen Begrenzungen, während kleinere Werte das weitere Verfahren unnötig verkomplizieren. Die Generalisierung des Polygons fußt auf der Betrachtung der Winkel zwischen aufeinanderfolgenden Liniensegmenten des Alpha-Shapes (vgl. Abb. 51: S. 54). Liegt der Wert unterhalb eines bestimmten Schwellwertes, können zwei Liniensegmente in einem einzigen vereint werden, als neue Richtung gilt dann der gemittelte Winkel der beiden Vorgänger.



 **Begrenzendes Alpha-Shape**
 **Vereinigte Liniensegmente**



 **Winkel zweier Liniensegmente**
 **Gemittelter Winkelwert**



 **Rechtwinkliger Grundriss**

Quelle: in [DOR-08]

Abb. 51: Ermittlung des Grundrisses

In Folge wird der Vorgang mit dem neuen Liniensegment und dem nächstfolgenden Segment des Alpha-Shapes erneut durchgeführt. Sobald alle Vereinigungen vollzogen wurden, erfolgt eine finale Ausrichtung der neuen Liniensegmente mittels Methode der kleinsten Quadrate. Um weiters Parallelität und Orthogonalität in den Grundriss einzuführen, wird zuerst nach dem längsten der soeben ausgeglichenen Segmente gesucht. Dessen Orientierung wird als Referenzausrichtung für die Anpassung der Lageeigenschaften der anderen Liniensegmente festgelegt.

Bei der Herstellung der Parallelität aufeinanderfolgender Segmente kann es u.U. notwendig sein zusätzliche Liniensegmente in dazu lotrechter Lage einzufügen, um eine Verbindung herzustellen. Der gegenteilige Fall tritt ein, wenn zwei Segmente vereinigt werden. Sobald alle gewünschten Eigenschaften hergestellt sind, werden die Liniensegmente wieder einem Ausgleichsverfahren unterzogen und durch anschließende Verschneidung der Kanten wird der endgültige Grundriss bestimmt.

Sobald der fertige Grundriss vorliegt, kann die Gebäudemodellierung abgeschlossen werden. Für das verfahrensbezogene Modell werden aus den dachrepräsentierenden Segmenten der Punktwolke Parameter für Ebenengleichungen bestimmt, sodass jede Dachfläche durch das mathematische Modell einer Ebene ausgedrückt werden kann. Aus diesem Polyedermodell lässt sich anschließend ein darstellungsbezogenes Modell ableiten, indem benachbarte Ebenen und Grundrisssegmente verschnitten werden – daraus entstehen Dachkanten, welche die Flächen einer Randdarstellung definieren (vgl. Abb. 52: S.55).

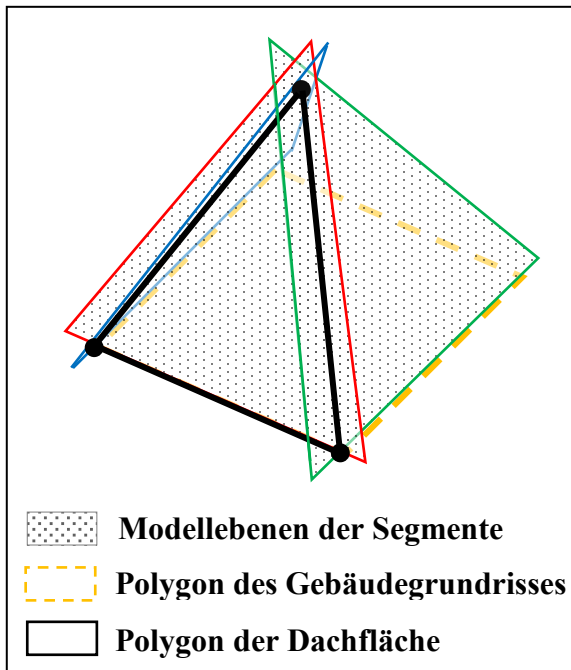


Abb. 52: Verschnitt der Modellebenen zur Ableitung von Dachflächen



Quelle: in [DOR-08]

Abb. 53: Gebäudemodelle, erstellt mittels Laserscanning-Analyseverfahren

Um eine Aussage bezüglich Vollständigkeit und Genauigkeit der erstellten Modelle treffen zu können wurde von den Autoren folgendes Testverfahren eingeführt:

- Konnte jedem koplanaren Segment der Wolke ein Dachflächenpolygon zugeordnet werden?
- Entsprechen die Flächen, die die Alpha-Shapes einnehmen, in etwa den Flächen der Dachflächenpolygone?
- Sind die Höhenwerte der Vertices eines Dachflächenpolygones mit den Höhenwerten der deckungsgleichen Punkte im koplanaren Segment vergleichbar?

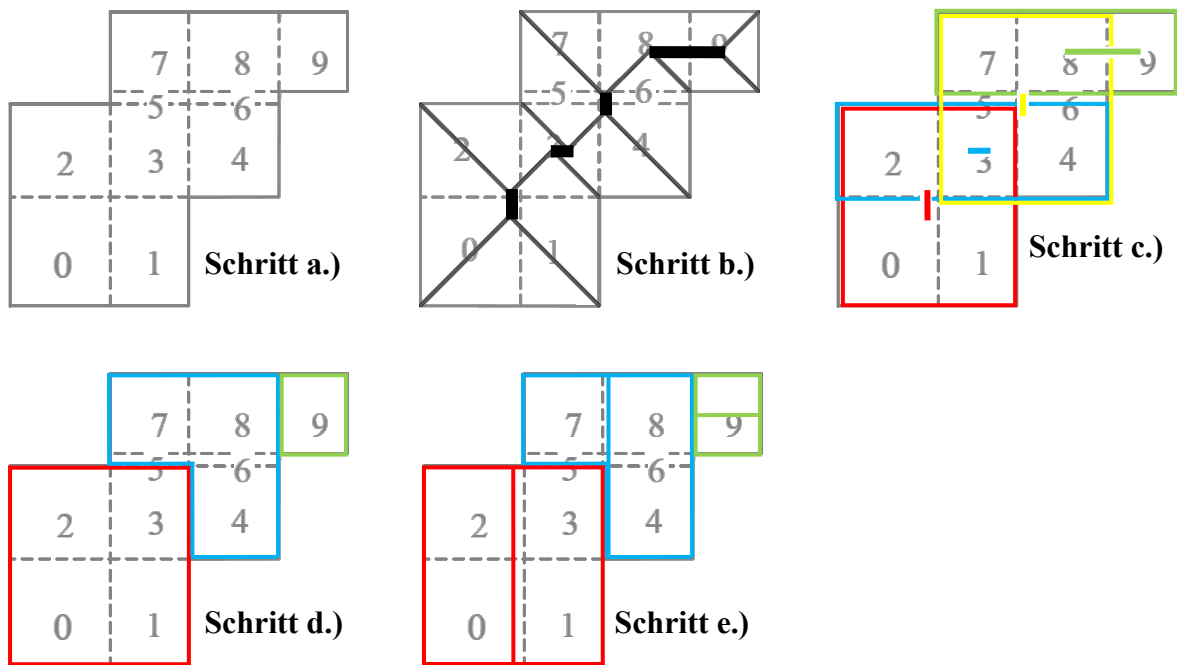
Im Evaluierungsprojekt, bei dem ein historischer Stadtkern (vgl. Abb. 53: S. 55) untersucht wurde ergab sich bezüglich dieser Kriterien folgendes Ergebnis. Für 75% der Gebäude konnte, bezogen auf die Messpunkte der ALS-Erhebung, ein vollständiges und genaues Modell erstellt werden. 60% der restlichen Gebäude konnten vom Verfahren immerhin mehr als zur Hälfte abgebildet werden. In Anbetracht dessen, dass es sich zwar um einen halbautomatischen Ansatz zur Punktwolkenanalyse handelt, die notwendigen Eingriffe des Operators jedoch auf ein Minimum beschränkt werden, spiegelt das Ergebnis das hohe Potential dieses Verfahrens wieder. Durch die Auswertung hochauflösender ALS-Aufnahmen sowie des Einsatzes von Polyedermodellen ist bei diesem Verfahren eine adäquate und genaue Abbildung sowohl komplexer Grundrisse als auch Dachformen möglich. Es darf jedoch nicht vergessen werden, dass Individualmodelle die Implementierung eines Verfahrens erschweren, und die nicht vollständig umgesetzten Modelle eine aufwändige, manuell durchzuführende Konstruktion nach sich ziehen.

3.4.3 Dachausmittlung und Konstruktives Komponentenmodell

Dieses Verfahren von Laycock und Day [LAY-03] erlaubt die vollautomatische Erstellung dreidimensionaler Gebäudemodelle unter Anwendung eines Dachausmittlungs-Algorithmus. Als Datengrundlage kommt dabei der Vektordatensatz Land-Line Plus aus der Feder der amtlichen britischen Vermessungsbehörde Ordnance Survey zum Einsatz. Dieser katasterähnliche Datensatz beschreibt die durch Menschenhand erschaffene Umwelt, wobei in diesem Fall aber nur auf die Ebene der Gebäudeumrisse zurückgegriffen wird. Diese liegen als topologisch unstrukturierte Linienelemente vor, mittels eines einfachen Suchalgorithmus, auf den hier nicht näher eingegangen wird, können daraus die für die folgende Analyse benötigten Grundriss-Polygone gewonnen werden.

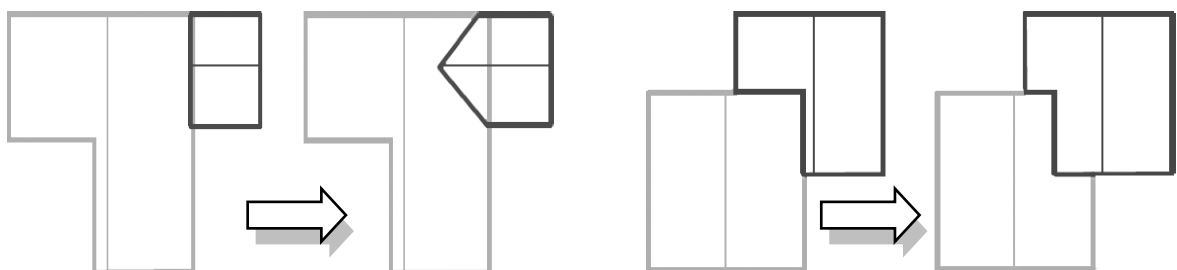
Die Verfahrensweise wird anhand eines Gebäudes demonstriert, das einen Umriss in Form eines orthogonalen Vielecks aufweist. Laut den Autoren weisen viele Gebäude zu ihrem Erbauungszeitpunkt einfache, rechtwinkelige Grundrisse mit wenigen Eckpunkten auf. Erst durch nachträgliche Umbauten entwickeln sich daraus verzweigte Gebäudeformen, wobei sich die Dachflächen der Anbauten in jene des bestehenden Gebäudes integrieren zu haben. Diese Sichtweise spiegelt sich auch im Erstellungsprozess des verfahrensbezogenen Modelles wieder. Zur Anwendung kommt ein Algorithmus der Dachausmittlung (vgl. Kap. 3.2.3: S. 38), der in der Lage ist den Grundriss in einfache Formen zu partitionieren, welche sich zueinander in wohldefinierten nachbarschaftlichen Verhältnissen befinden (vgl. Abb. 54: S. 57). Dies erlaubt ein konstruktives Komponentenmodell zur Abbildung der Dachflächen einzusetzen.

- a. Die Aufteilung des Grundrisses erfolgt mittels achsparalleler Strahlen in vertikaler und horizontaler Lage, deren Ausgangspunkte in den konkaven Eckpunkten des Gebäudes liegen. Die Schnittpunkte dieser Strahlen beschreiben die Eckpunkte von deckungsfreien Teilmengen der Gesamtfläche des Polygons.
- b. Gleichzeitig wird ein Straight-Skeleton (vgl. Kap. 3.2.3: S. 38) in den Grundriss eingepasst, dessen orthogonale Liniensegmente selektiert werden.
- c. Jede dieser Kanten wird konzentrisch mit einem achsparallelen Rechteck umschlossen, die Ausdehnung dieser Rechtecke wird durch die nächstliegenden Kanten des Grundrisses begrenzt.
- d. Pro Rechteck werden jene Teilmengen der Gesamtfläche vereint, die sich innerhalb der Ausdehnung des Rechtecks befinden.
- e. In diese neu entstandenen Flächen werden nun parametrisierte Satteldächer eingepasst. Die Art der Zusammenführung von Dachflächen zweier benachbarter Dächer wird anhand eines Regelsatzes bestimmt. Dabei ist die Anzahl der sich berührenden Dachkanten ausschlaggebend (vgl. Abb. 55: S. 57).



Quelle: in [LAY-03]

Abb. 54: Partitionierung eines verzweigten Grundrisses in einfache Formen



WENN: Die Berührung erfolgt entlang einer Dachkante.

DANN: Den First des Anbaues verlängern, bis die Dachfläche des Hauptgebäudes berührt wird.

WENN: Die Berührung erfolgt entlang zweier Dachkanten.

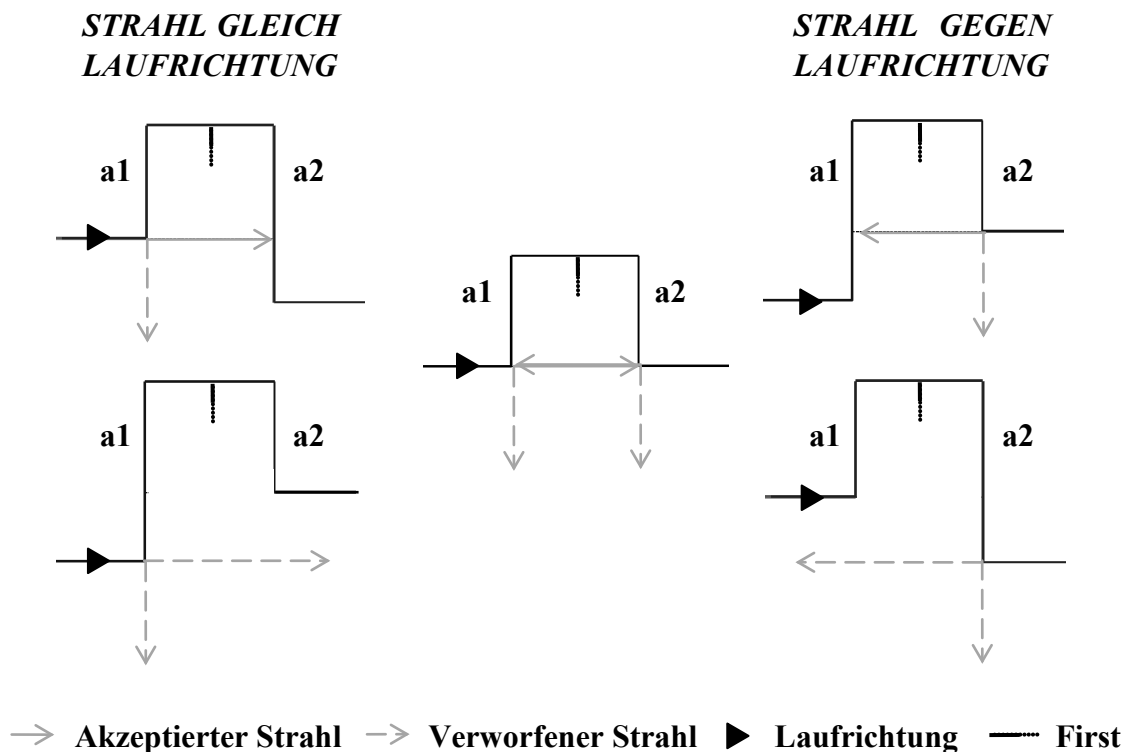
DANN: Die parallel zum First verlaufenden Dachkanten mittig in die Dachflächen versetzen.

Quelle: in [LAY-03]

Abb. 55: Zusammenführung benachbarter Dachflächen mithilfe eines Regelsatzes

Sugihara und Hayashi merken zum vorangehenden Verfahren an, dass im Falle sehr verzweigter Gebäudegrundrisse der Algorithmus unnötig komplizierte Partitionierungen erzeugt, dessen Dächer sich im konstruktiven Komponentenmodell nicht immer ineinander integrieren lassen. Sie präsentieren in ihrer Implementierung [SUG-08] ein alternatives Verfahren zur Dachausmittlung orthogonaler Grundriss-Polygone.

Auch hierbei erfolgt als erster Schritt die Aufteilung des Grundrisses mittels achsparalleler Strahlen, die von den konkaven Eckpunkten des Polygons aus verlaufen. Im Unterschied zum zuvor beschriebenen Verfahren bestimmt aber hier ein Auswahlprozess, welche der Strahlen zur Partitionierung des Polygons beitragen und welche nicht. Das orthogonale Polygon wird dazu im Uhrzeigersinn durchlaufen, für jeden Vertex wird bestimmt, ob sich der folgende Nachbar zu seiner linken oder seiner rechten befindet. Pro Links-Vertex wird anschließend die Anzahl der unmittelbar darauf folgenden Rechts-Vertices ermittelt. Abhängig von diesem Wert wird aus dem Vergleich der Kantenlängen ($a1$, $a2$) des Polygons sowie der Strahl- zu Laufrichtung bestimmt, welche vom Links-Vertex ausgehenden Strahlen für die Partitionierung akzeptiert bzw. verworfen werden (vgl. Abb. 56: S. 58).

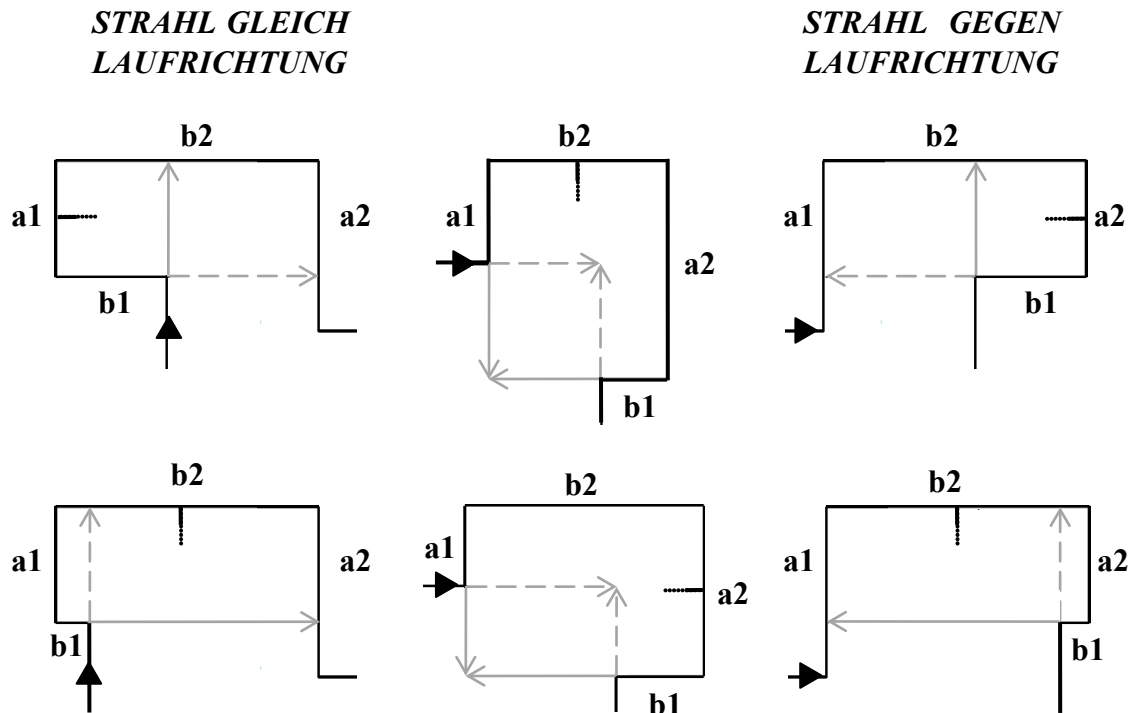


Quelle: in [SUG-08]

Abb. 56: Darstellung aller Fälle eines Laufrichtungs- und Längenvergleiches (Situation: „zwei folgende Rechts-Vertices“)

Ab drei folgenden Rechts-Vertices kann es durch die mehrdeutigen Formausprägungen in diesem Teil des Polygons erforderlich sein eine Anpassung der Firstlinie vornehmen zu müssen. Deren Verlauf kann bestimmt werden, indem zwei weitere Kantenlängen ($b1$, $b2$) des Polygons zur Betrachtung in das Auswahlverfahren mit einfließen (vgl. Abb. 57: S. 59). Nach jedem Auswahlschritt vereinfacht sich die Form des Grundrisses, da abhängig von der Anzahl der folgenden Rechts-Vertices mindestens zwei Eckpunkte wegfallen. Durch einen neuen Durchlauf wird die Liste der Links-/Rechts-Vertices den sich geänderten Gegebenheiten angepasst und der Auswahlprozess wiederholt sich bis das

gesamte Grundriss-Polygon in Rechtecke partitioniert ist. Abschließend erfolgt die Einpassung von Satteldächern in jede der neu entstanden Flächen. Die Integration von Dachflächen benachbarter Dächer erfolgt gleich dem vorherigen Verfahren anhand eines Regelsatzes.



→ Akzeptierter Strahl → Verworfenner Strahl ► Laufrichtung — First

Quelle: in [SUG-08]

Abb. 57: Darstellung jener Fälle eines Laufrichtungs- und Längenvergleiches, die in mindestens einem akzeptierten Strahl resultieren (Situation: „drei folgende Rechts-Vertices“)

Die Erstellung des darstellungsbezogenen Modelles erfolgt durch Konstruktion im CSG-Verfahren. Dabei repräsentieren die Volumenkörper Quader und Prisma jeweils unterschiedliche Bestandteile eines Gebäudes, wie Dachgeschoss, Gebäudetorso oder Dachfläche (vgl. Abb. 58: S. 60). Die Primitivauswahl sowie deren Position, Lage und Skalierung kann aus den im konstruktiven Komponentenmodell eingesetzten Bestandteilen und den zur Anwendung kommenden Kombinationen ermittelt werden. Mangels vorhandener Höhenangaben in den rein planimetrischen Datengrundlagen werden vordefinierte Werte für Gebäudehöhen und Dachneigungen verwendet, generell stellt es aber kein Problem dar gebäudespezifische Höhenausprägungen attributiv über Geofachdaten einzubinden.

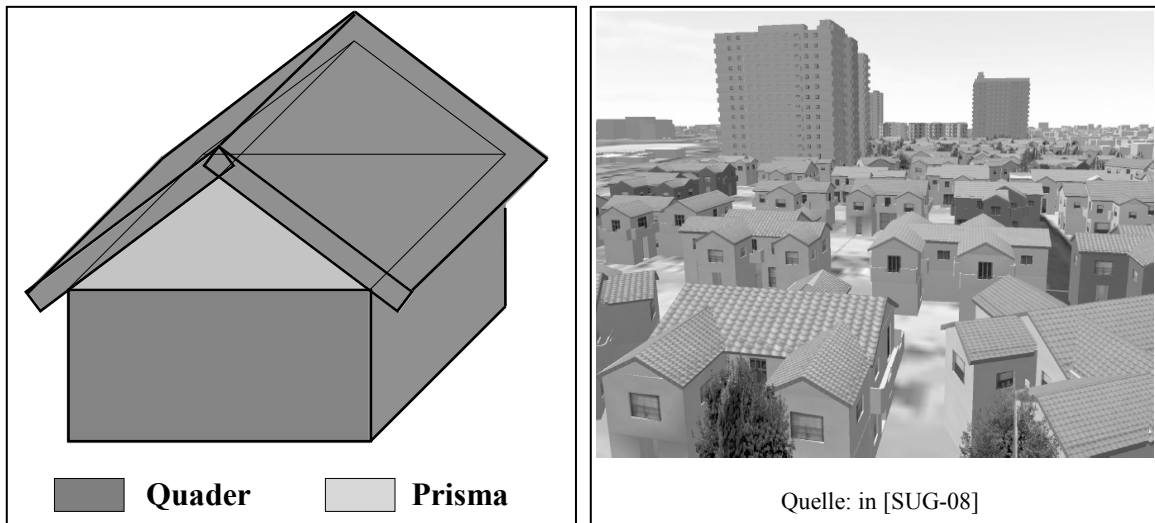


Abb. 58: Gebäudekonstruktion, bestehend aus einfachen CSG-Primitiven

Abb. 59: Gebäudemodelle, erstellt mittels Dachausmittlungsalgorithmus

Durch den Einsatz der Dachausmittlung als alleinige Analyseverfahren gelten für beide Verfahren die damit einhergehenden Einschränkungen (vgl. Kap. 3.2.3: S. 38). Die zusätzliche Beschränkung auf orthogonale Umrisse führt dazu, dass im Modell nun sowohl bei den Dachformen als auch Grundrissen Abweichungen vom realen Sachverhalt auftreten können. Somit kann die Aussage getroffen werden, dass sich dieses Verfahren nicht dazu eignet Gebäude mit außergewöhnlichen Dachkonstruktionen oder schiefwinkligen Grundrissen abzubilden, was z.B. historische Stadtkerne ausschließt. Die Einführung dieser Beschränkung gestattet jedoch einen hohen Grad an Automatisierung und erzeugt verlässlich Gebäudemodelle, die dem Anspruch der Plausibilität genügen. Insofern bietet sich diese Erzeugungsweise an, wenn es gilt die peripheren Bereiche einer urbanen Umgebung (vgl. Abb. 59: S. 60) schnell und einfach zu erfassen, um somit die Abdeckung eines 3D-Stadtmodells auszuweiten oder Lücken aufzufüllen.

4 Exemplarische Implementierung eines Verfahrens zur Dachflächenmodellierung

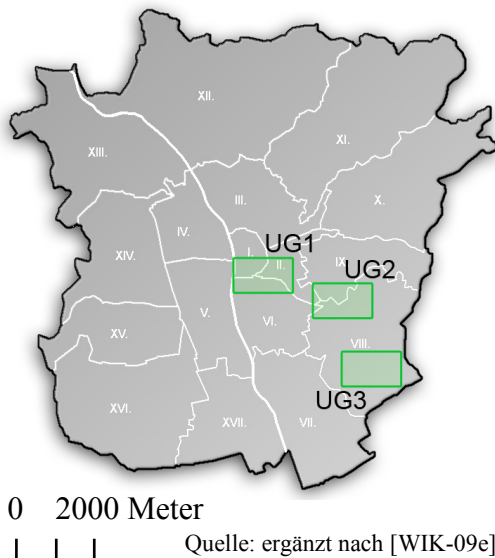
Nachdem verschiedene Verfahrensansätze der Dachflächenmodellerstellung (vgl. Kap. 3.4: S. 45) anhand ihrer Abbildungseigenschaften erläutert wurden, kann sich nun der Forschungsfrage zugewendet werden. Am Anfang dieses Kapitels sollen zunächst jene Anforderungen ermittelt werden, die an ein Verfahren zu stellen sind, sodass eine adäquate Abbildung der Dachlandschaft erreicht werden kann. In einer praktischen Umsetzung sollen diese Erfordernisse implementiert, und mithilfe des Verfahrens ein Modell ausgewählter Dachlandschaften erzeugt werden. Eine abschließende visuelle Gegenüberstellung mit der Realität soll dazu dienen etwaige Unzulänglichkeiten des Modelles zu beurteilen und somit die „Grenzen einfacher Lösungsansätze der Dachflächenmodellierung“ aufzudecken. Neben der Evaluierung soll natürlich die Möglichkeit geboten werden Einblick in die Implementierung der Verfahrensschritte zu nehmen, um so das bisher theoretisch vermittelte Wissen im praktischen Einsatz zu erleben.

4.1 Anforderungsprofil an die Implementierung

Für eine Reihe vorgegebener Untersuchungsgebiete (UG) sollen die Mindestanforderungen an die verfahrensbestimmenden Prozesse der Modellerstellung (vgl. Kap. 3.1: S. 31) festgelegt werden, damit eine adäquate Abbildung der Dachlandschaften im Bereich der Größenordnung von LOD 1 bis LOD 2 erreicht werden kann. Diese, im unteren Bereich angesiedelte Detailstufe, wurde anvisiert, da es unter der Prämisse des Einsatzes einfacher Mittel der Modellerstellung bereits im Vorhinein aussichtslos erscheint höhere Detailstufen anzupeilen. Die Analyse der Erfordernisse basiert auf einer eingehenden Inspektion von Luftbildern zur Beurteilung der baulichen Situationen in den UG. Die daraus gezogenen Annahmen der Mindestanforderungen fußen auf theoretischen Erkenntnissen, die im Zuge der Literaturrecherche zu Verfahren der Dachflächenmodellerstellung gewonnen werden konnten (vgl. Kap. 3.4: S. 45).

4.1.1 Untersuchungsgebiete

LAGE DER UNTERSUCHUNGS- GEBIETE IM RAUM GRAZ



Drei unterschiedliche Untersuchungsgebiete (UG) im Raum Graz:

- Stadtkern
- Wohnsiedlung
- Gewerbezone

sollen einen repräsentativen Ausschnitt eines typisch inhomogenen, urbanen Gebietes repräsentieren (vgl. Abb. 60: S. 62). Durch die unterschiedlichen Ausprägungen der Gebiete wird erwartet die Eignung des Verfahrens einer umfassenden Evaluierung unterziehen zu können.

Abb. 60: Lage der Untersuchungsgebiete im Raum Graz

- UG1 – Stadtkern: Die Lage dieses zentral gelegenen, bevölkerungsreichsten Untersuchungsgebietes wurde in Hinblick auf innerstädtische Gebäudestrukturen gewählt und befindet sich in der Grenzregion der Grazer Stadtbezirke Innere Stadt (I.), St. Leonhard (II.) und Jakomini (VI.). Das Gebiet zeichnet sich durch einen Mix aus zahlreichen Prunk- und Wohnbauten aus der Gründerzeit sowie großen Gebäudekomplexen aus späteren Epochen aus.
- UG2 – Wohnsiedlung: Dieses Gebiet befindet sich im östlichen Teil von Graz, zwischen den beiden Stadtbezirken Waltendorf (IX.) und St. Peter (VIII.) und soll unterschiedliche Siedlungsformen abdecken. Es finden sich neben großen und mittleren Wohnbauten auch freistehende Einfamilienhäuser.
- UG3 – Gewerbezone: Im südöstlichen Teil von Graz, dem südlichen St. Peter, befindet sich mit dem Industriepark Messendorf ein weitläufiges gewerblich genutztes Areal.

4.1.2 Anforderungen an die Auswertemethode

Mit Ausnahme der Gewerbezone begegnet man in allen UGs mitunter auf Schwankungen der Traufenhöhe. Dies trifft sowohl beim Vergleich aggregierter Gebäudeformen (Baublöcke oder Gebäudekomplexe) zu als auch bei differenzierter Betrachtung einzelner

Gebäude innerhalb solcher Bauformen (vgl. Abb. 61: S. 63). Um eine zufriedenstellende Abbildung der Dachlandschaften bezüglich dieser Eigenschaft erreichen zu können ist also die Ermittlung der entsprechenden Höhenwerte unabdingbar, womit zumindest auf photogrammetrische oder ALS-Auswertungen zurückgegriffen werden muss.



— Vergleich aggregierter Gebäudeformen

○ Vergleich einzelner Gebäude

Luftbild: [VRE-09]

Abb. 61: Differenzierte Betrachtung variierender Traufenhöhen

Mit Ausnahme der Gewerbezone herrscht in allen UGs eine große Varianz unterschiedlicher Dachformen vor. Unter der Annahme, dass ein Modelltyp zum Einsatz kommen wird, der dieser Herausforderung in adäquater Weise begegnen kann, müssen im Zuge der Auswertung die entsprechenden Dachflächenmerkmale gewonnen werden. Somit stehen verschiedene Auswertestrategien zur Auswahl, das Spektrum reicht dabei von der manuellen Interpretation von Luftbildern zur Bestimmung einer prototypischen Dachform, bis hin zur automatisch durchgeführten Analyse einer ALS-Punktwolke zur Anfertigung eines individuellen Dachflächenmodelles.

Der Grundriss einer Dachkonstruktion orientiert sich in den meisten Fällen am Gebäudegrundriss, lässt sich also hinreichend ohne weitere Auswertung aus einem topologisch behafteten Kataster übernehmen. Der höchste Grad an Genauigkeit bei horizontalen Messungen der Dachlandschaft kann freilich erst durch eine photogrammetrische Auswertung von Luftbildern erreicht werden [KAA-06]. Wie bereits erwähnt, können dabei Verschattungen oder Hindernisse wie Bäume den Vorgang erschweren (vgl. Kap. 3.2.1: S. 32), es bietet sich somit ein kombinierter Einsatz mit dem Kataster an, durch den eine eindeutige Zuordnung der Messpunkte auf Gebäudebasis ermöglicht wird, was sich besonders bei der Identifikation von Gebäuden innerhalb von Baublöcken als hilfreich erweist (vgl. Abb. 62: S. 64).

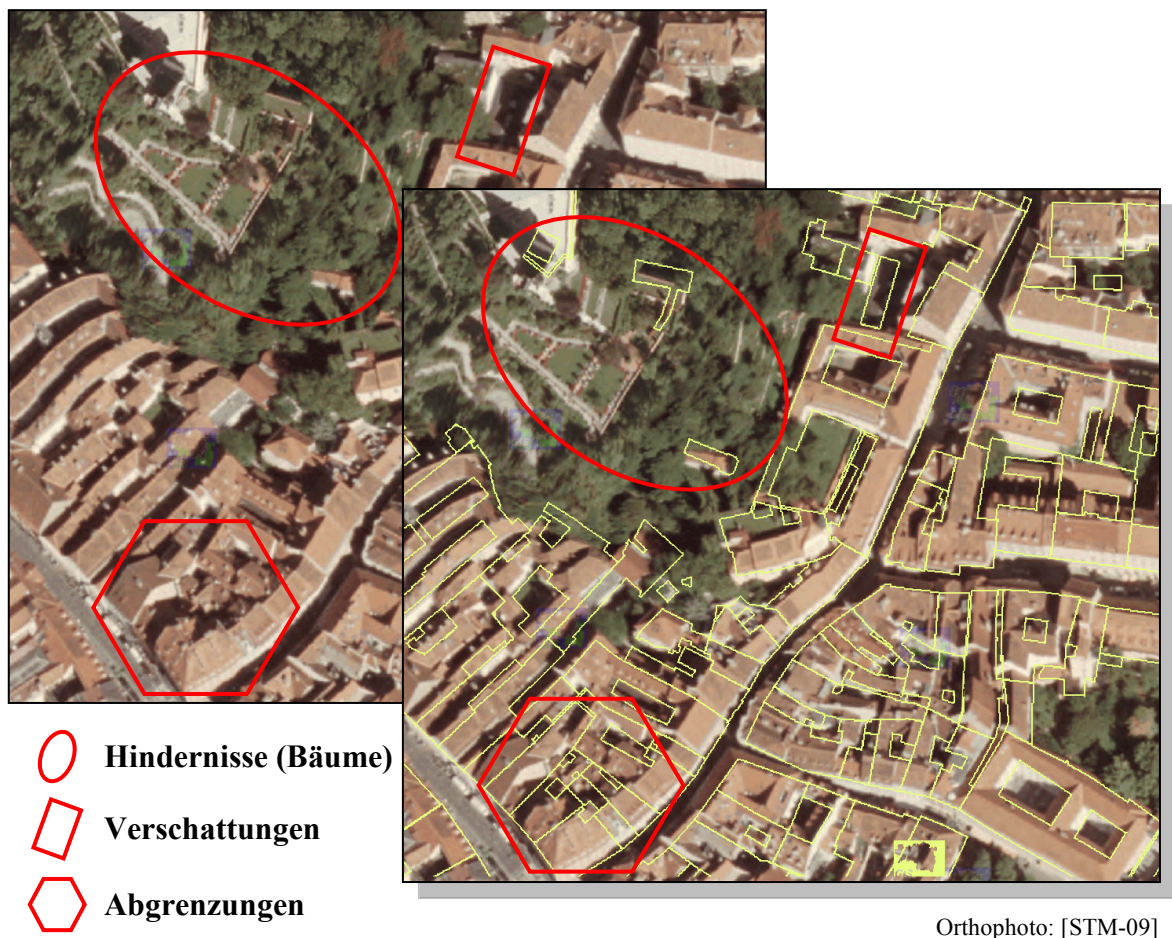


Abb. 62: Kombiniertes Einsatz von Luftbild und Kataster zur Erleichterung des Auswertevorganges

4.1.3 Anforderungen an den Modelltyp

Im innerstädtisch geprägten UG1 finden sich vornehmlich Baublöcke deren Grundrisse auf den ersten Blick schiefwinkelig und sehr individuell anmuten. Verlagert man jedoch die Betrachtungsebene vom Block auf das einzelne Gebäude, ist festzustellen, dass sich die erstgenannte Eigenschaft nunmehr ausschließlich auf die abgewinkelten Eckbauten beschränkt und sich die Grundrisse zumeist einfachen Figuren zuordnen lassen (vgl. Abb. 63: S. 65). Die vorherrschende Dachform stellt das Satteldach dar. Da es sich im Baublock jeweils um eigenständige Gebäude handelt, finden Verschneidungen der Dachflächen nur gebäudeintern, aber praktisch nie zwischen benachbarten Dächern statt. Durch diese prototypenfreundlichen Eigenschaften wird davon ausgegangen, dass bei geschickt gewählten Grundrisstypen eine adäquate Abbildung von innerstädtischen Baublöcken bereits mit parametrisierten Modellen erreicht werden kann.

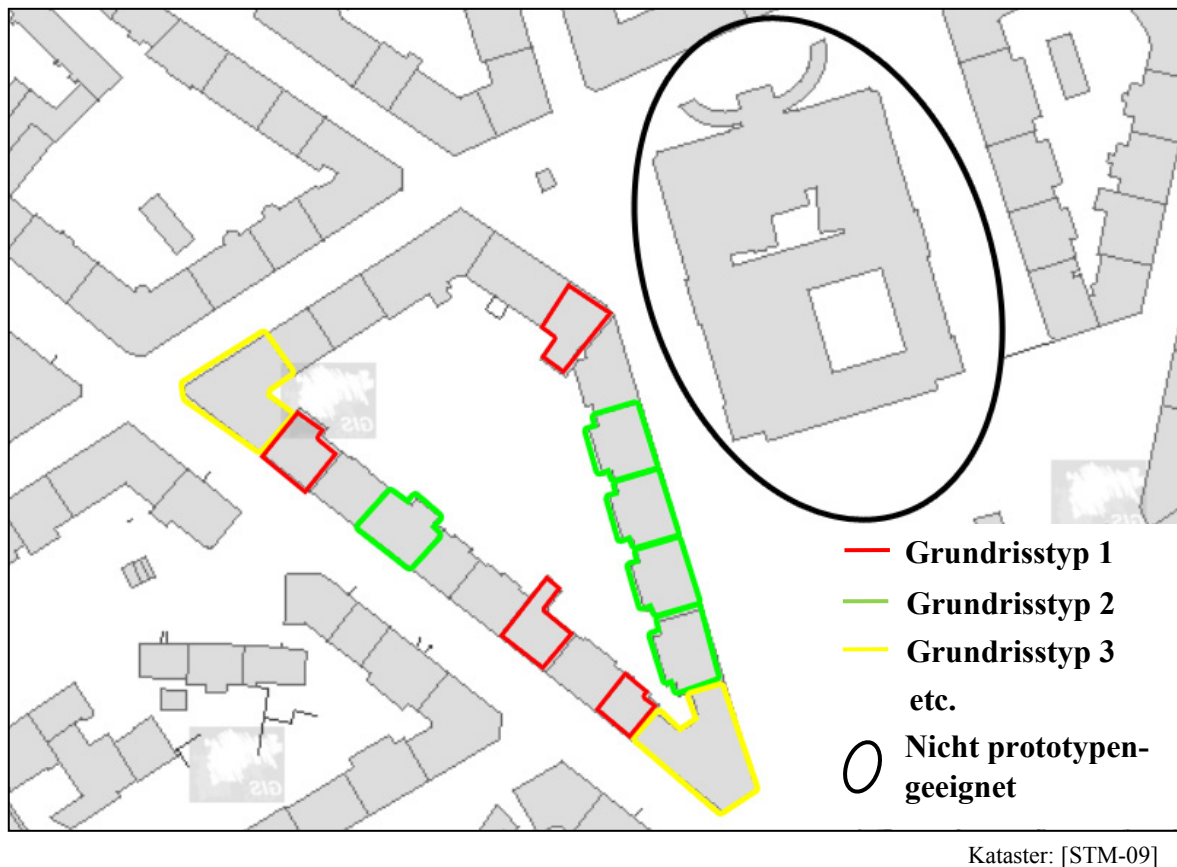


Abb. 63: Prototypengeeignete und -ungeeignete Gebäudeformen im UG1

Vereinzelt finden sich im Stadtkern auch Gebäudekomplexe oder andere, aus mehreren Trakten bestehende Gebäude (Kirchen, Theater, Universitäten, etc.). Je kompakter, d.h. je verschachtelter oder unselbstständiger, die Bauform eines solchen Gebäudes ausfällt (vgl. Abb. 64: S. 66), umso ungeeigneter scheint eine prototypenbasierte Methode zu sein und es sollte ein höherrangigeres Modell (vgl. Abb. 41: S. 42) zur Abbildung eingesetzt werden. Ein prototypenbasierter Ansatz scheint nur dann erfolgversprechend wenn folgende Kriterien erfüllt werden:

- lockere Bauform vorherrscht, es sich also um eigenständige, freistehende Gebäudetrakte handelt zwischen denen keine Dachverschneidungen auftreten. Dies trifft prinzipiell bei unterschiedlich hohen Gebäudetrakten zu.
- Natürlich müssen für diese, dem Anwendungsbereich, entsprechend detaillierte Prototypen bezüglich der kombinierten Abbildung von Grundriss und Dachform vorliegen.



Niederrangiger Modelltyp ausreichend



Höherrangiger Modelltyp erforderlich

Luftbild: [VRE-09]

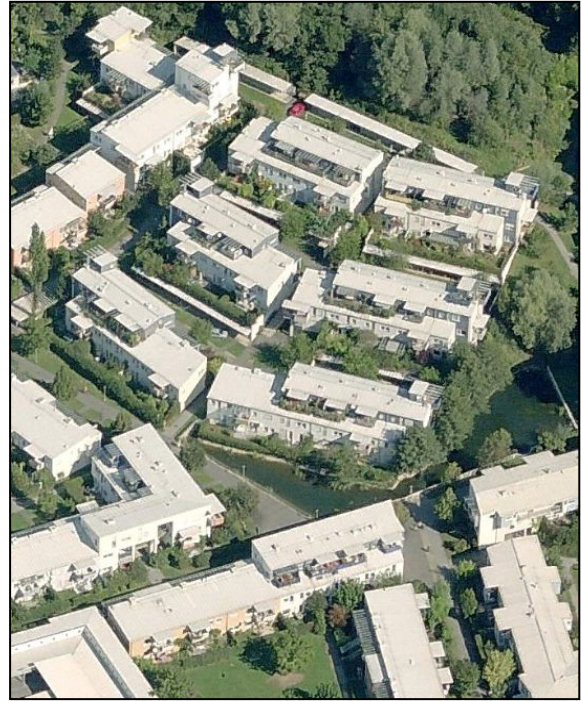
Abb. 64: Gebäudekomplexe mit eigenständigen und verschachtelten Gebädetrakten im UG1

In der Wohnsiedlung von UG2 trifft man hauptsächlich auf Wohnbauten und freistehende Einfamilienhäuser. Die Wohnbauten treten häufig als Gebäudekomplexe auf, einzelne Gebäude eines solchen Komplexes können sich durchwegs durch ihre ungewöhnlichen Grundrisse, meist fernab der vordefinierten Prototypen, auszeichnen (vgl. Abb. 65: S. 67). Im Gegensatz zum innerstädtischen Bereich begegnet man hier allerdings praktisch keinen komplexen Dachkonstruktionen, als bestimmende Dachform gilt das Flachdach. Dieser Umstand sollte die Nutzung einfacher prismatischer Modelle erlauben, welche gestatten individuell auf die speziellen Grundrissfiguren einzugehen ohne die hierbei vorherrschende Dachform zu vernachlässigen. Nichtsdestotrotz müssen zur Festlegung der Mindestanforderung die bereits erwähnten Kriterien in Betrachtung gezogen werden:

- Bei lockerer Bauform mit eigenständigen Gebäudeeinheiten kann je nach Ausprägtheit des Grundrisses ein einfaches parametrisiertes oder prismatisches Modell als Mindestanforderung angesehen werden.
- Trifft man hingegen auf gedrängte, verschachtelte Bauformen, sollte zur korrekten Modellierung auf höherrangigere Modelltypen ausgewichen werden.



Niederrangiger Modelltyp ausreichend



Höherrangiger Modelltyp erforderlich

Luftbild: [VRE-09]

Abb. 65: Gebäudekomplexe mit eigenständigen und verschachtelten Gebädetrakten im UG2

Die freistehenden Einfamilienhäuser weisen zu einem guten Teil großen Variantenreichtum bezüglich der Formgestaltung auf, dies mag im Umstand begründet liegen, dass sie sich nicht in bestehende Gegebenheiten wie Baublöcke integrieren müssen. Im Falle der Grundrisse findet man ein breites Spektrum:

- einfache geometrische Formen,
- daraus kombinierte Figuren
- oder vereinzelte, undefinierbare Formgebilde.

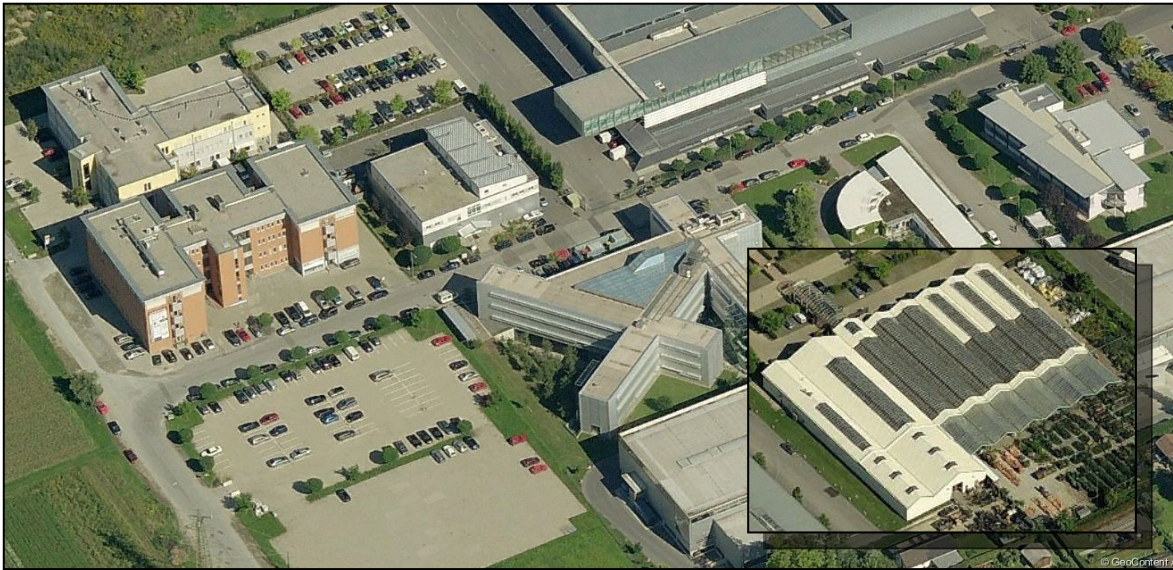
Als Dachformen stellen sich meistens Sattel- bzw. Walmdächer ein, gelegentlich auch Flachdächer. Die Dachkonstruktionen entsprechen meist dem Grundriss, nur selten findet man Dachflächenverschnidungen die „über das Ziel hinausschießen“ (vgl. Abb. 66: S.68).



Luftbild: [VRE-09]

Abb. 66: Freistehende Gebäude unterschiedlicher Formgestaltung im UG2

Zur Mindestanforderung an den Modelltyp kann nur gesagt werden, dass aufgrund der bestimmenden Dachformen kein prismatisches Modell zur adäquaten Abbildung von Einfamilienhäusern geeignet erscheint. Ob aber bereits ein einfaches parametrisiertes Modell ausreicht oder besser ein höherwertiges konstruktives Komponenten- bzw. Polyedermodell zum Einsatz kommen soll, kann durch die mögliche Charaktermvarianz der Gebäude nicht per se festgelegt werden. Erst nach einer ausführlichen Evaluierung kann gesagt werden ob infolge des Einsatzes eines niederrangigen Modelltyps, die sich unweigerlich ergebenden Abstriche im Detaillierungsgrad dem angestrebten Anwendungsbereich gerecht würden. Dies soll jedoch keine Aufforderung sein unüberlegt zum höherrangigen Modelltyp zu greifen, im Gegensatz zu den Gebäudetypen, die bisher den Einsatz eines Individualmodelles rechtfertigten, handelt es sich in diesem Falle nicht um ein vereinzelt Auftreten von Gebäuden auf quasi wohldefinierten Standorten, sondern um eine flächendeckende Aufnahme, die bei unbegründetem Einsatz enorme Ressourcen verschlingen würde.



Luftbild: [VRE-09]

Abb. 67: Komplexe Grundrisse und einfachen Dachformen der Gebäude im UG3

In der Gewerbezone des UG3 sind außergewöhnliche, mitunter schiefwinkelige Grundrisse vorzufinden, die im Gegensatz dazu fast ausnahmslos mit einfachen Dachkonstruktionen gepaart auftreten (vgl. Abb. 67: S. 69). Anzutreffen sind vornehmlich Flachdachformen, selten auch Satteldächer, deren Dachneigung aufgrund der ausgedehnten Gebäudeformen jedoch gering gehalten ist. Ist dieser Umstand vernachlässigbar, sollte bereits ein einfaches prismatisches Modell gutes Dienste leisten.

4.2 Spezifikation des Verfahrens

4.2.1 Zielsetzung

Durch die Anwendung einfach umzusetzender Lösungsansätze sollen sich Vorteile sowohl für die Implementierung des Verfahrens (Entwickler) als auch den Prozess der Modellerstellung (Benutzer) ergeben:

Entwickler

Es soll ein hybrides Verfahren zur einfachen Erstellung von Dachflächenmodellen entwickelt werden. Dieser Ansatz soll es ermöglichen für komplexe Arbeitsschritte auf bereits bestehende Werkzeuge zurückgreifen zu können, während für den Rest des Verfahrens eine individuelle Umsetzung mit einer selbstentwickelten Applikation erfolgt. Somit ergibt sich auch für Entwickler mit begrenzten Ressourcen (Zeit, Personenstunden, Wissen) die Möglichkeit Erfahrung infolge einer konkreten Verfahrens-Umsetzung zu sammeln. Es besteht allerdings die Gefahr, dass bestehende Werkzeuge nur ungenügend

auf individuelle Anforderungen reagieren können und, in Anbetracht der erwähnten Ressourcen, selbstentwickelte Anwendungen nur ungenügende Resultate produzieren.

Benutzer

Es soll kein Expertenwissen für den Prozess der Auswertung erforderlich sein, konkret bedeutet dies z.B. keine dreidimensionalen Dachflächenmerkmale auf einer photogrammetrischen Auswertestation bestimmen zu müssen, sondern maximal zweidimensionale Umrisse innerhalb eines Standard-GIS zu digitalisieren. Weiters sollen keine zeitaufwändigen und fehleranfälligen Modellierungsprozesse einzelner Dachflächen erforderlich sein, sondern vordefinierte Dachformen anhand eines Kataloges bestimmt werden. Diese vereinfachte Herangehensweise birgt jedoch Gefahr dem Anwendungsbereich nicht entsprechende Modelle zu erzeugen.

4.2.2 Umsetzung des Anforderungsprofiles

Die Auswertung soll manuell anhand von Orthophotos erfolgen und eine Verortung der Grundrisse sowie eine, attributiv festzuhaltende, Interpretation der Dachform umfassen. Die Auflösung der Bilder sollte bei mindestens 0,25 m/Pixel liegen, da bei niedrigeren Auflösungen die Abgrenzung einzelner Gebäude eines Baublockes oder die Auswertung kleinerer Objekte wie Einfamilienhäuser zu schwer fallen würde. Optional soll die Angabe einer Firstline pro Dach gestattet sein, womit sich der First bei Satteldächern versetzen oder wenden lassen wird. Die Traufenhöhe soll automatisiert anhand von ALS-Daten bestimmbar sein, eine zusätzliche Ermittlung der Dachneigung ist jedoch nicht umsetzbar. Es sollen allerdings in einem Analysevorgang Gebäude mit Flachdächern detektierbar sein, dies soll die Bestimmung der Dachformen beschleunigen, dazu werden Laserscanningdaten mit 1 Punkt/m² als ausreichend angesehen.

Für die automatisierte Modellbildung soll ein kombinierter Ansatz aus parametrisierten und prismatischen Modelltypen zum Einsatz kommen. Mit minimalem Implementierungsaufwand sollten sich auf diese Weise:

- weite Teile des UG1 – Stadtkern (Baublöcke)
- nahezu das gesamte UG3 – Gewerbezone
- sowie bestimmte Teile des UG2 – Wohnsiedlung (Wohnbauten in lockerer Bauform und einfach gehaltene Einfamilienhäuser)

in adäquater Qualität (LOD 1 bis LOD 2) abbildbar sein. In Hinblick eines gemeinsamen Einsatzes von Prototypen für Gebäude des Baublockes und einfache Einfamilienhäuser sollen die dafür gängigsten Kombinationen aus Grundriss und Dachform (Sattel-, Walm- und Flachdach) umgesetzt werden. Aufgrund fehlender Ressourcen kann für Gebäude(komplexe) des innerstädtischen Bereiches und der Wohnsiedlung – die erfahrungsgemäß einen höherrangigeren Modelltyp erfordern – keine diesbezüglichen Implementierungen erfolgen. Für diese Fälle wird eine nicht akzeptable Abbildungsqualität

erwartet, welche sich vermutlich als Grenze einfacher Lösungsansätze entpuppen wird. Welche Auswirkungen sich konkret aufgrund der Abbildung solcher Gebäudetypen mit niederrangigeren Modelltypen ergeben wird die Evaluierung zeigen.

4.2.3 Datenherkunft

Für die Visualisierung sollte ein Datensatz bereitstehen, der auch eine lückenlose Abdeckung zwischen den UGs erlaubt. Aufgrund der enormen Datenmenge, die auswertungsfähige Geodaten für solch ein großflächiges Gebiet aufweisen würden, musste allerdings auf niedriger aufgelöste Datensätze zurückgegriffen werden. Diese, vom BEV erhobenen, Geodaten wurden im Rahmen dieser Arbeit vom Institut für Geographie und Regionalforschung der Universität Wien bereitgestellt.

Die Datensätze zur Auswertung sollten ursprünglich von der steirischen Landesregierung über das GIS-Steiermark bezogen werden, es gab jedoch Termschwierigkeiten bei der Datenlieferung, sodass schnell ein Ersatz gefunden werden musste. Nach etlichen Testversuchen fiel die Entscheidung auf den freien Kartendienst Virtual Earth der Firma Microsoft [VRE-09]. Es wurden Screenshots hochaufgelöster Orthophotoabbildungen der entsprechenden UG erstellt und innerhalb eines GIS auf den Visualisierungsdatensatz georeferenziert. Aufgrund der kleinen Gebietsausschnitte, geringer Höhenunterschiede und letztendlich der im unteren Bereich angesiedelten Detailstufe dieses Verfahrens konnte der Einsatz dieser eher unkonventionellen Methode als Notlösung vertreten werden.

4.2.4 Übersicht des Verfahrens

Werkzeuge und Anwendungen

- Desktop-GIS: ArcGIS 9.x mit SpatialAnalyst Erweiterung
- 3D-Bibliothek: OpenSceneGraph 2.x mit OSGGIS Erweiterung
- Beispielapplikation: Win32-C++ Anwendung

Verfahrensablauf

Bis aus Datengrundlagen ein Dachflächenmodell erstellt ist und dieses visualisiert werden kann, sind mehrere Prozesse zu durchlaufen. Diese lassen sich in vier Verfahrensschritte gliedern und werden im Folgenden kurz vorgestellt:

- In einem Desktop-GIS erfolgt die größtenteils manuelle Auswertung der Datengrundlagen zur Erstellung des verfahrensbezogenen Modelles.
- In einem Utility, der in späterer Folge zur Visualisierung eingesetzten 3D-Bibliothek, erfolgt die Migration des verfahrensbezogenen Modelles zu einer Vorstufe des darstellungsbezogenen Modelles.

- In einer selbstentwickelten Beispielapplikation erfolgt automatisiert die Fertigstellung des darstellungsbezogenen Modelles, ausgerichtet auf den Anwendungsbereich der Visualisierung.
- Die Visualisierung des Dachflächenmodelles mit weiteren Objektgruppen eines 3D-Stadtmodelles ermöglicht durch Vergleich mit Schrägluftbildern eine Evaluierung des Verfahrens hinsichtlich der adäquaten Abbildung von Dachlandschaften.

4.3 Erstellung des verfahrensbezogenen Modelles

Das Ziel dieses Verfahrensschrittes ist die Auswertung der Datengrundlagen zur Erzeugung eines verfahrensbezogenen Modelles der Dachlandschaft:

Eingabe: Datengrundlagen

- Orthophotos: RGB-Raster, 0,25 m/Pixel
- 2,5D-DHM aus ALS-Erhebung: ASCII-Format, 1 Punkt/m²
- 2,5D-DOM aus ALS-Erhebung: ASCII-Format, 1Punkt/m²

Ausgabe: Verfahrensbezogenes Modell

- Geobasisdaten Dachgrundrisse: 2D-Shapefile, Geometrietyp: Polygon
- Geofachdaten Dachform: dBASE-Format
- Geobasisdaten Firstlinien: 2D-Shapefile, Geometrietyp: Polyline

Die Auswertung erfolgt innerhalb des Desktop-GIS, durch die geographische Lage von Graz wird als Bezugssystem der Geodaten das Österreichische Bundesmeldenetz, Zone M34 eingesetzt. Der Verfahrensschritt teilt sich in einen manuellen Prozess der Modellauswahl und -einpassung sowie einen automatisierten Analyseprozess zur Vervollständigung ausstehender Modellparameter.

4.3.1 Modellauswahl und -einpassung

Der Operateur kann bei jedem Gebäude entscheiden, ob ein parametrisiertes oder prismatisches Modell erstellt werden soll. Anhand der Bildvorlage der Orthophotos wird im Maßstab 1:500 oder größer ein dafür möglichst adäquates Shape-Feature (vgl. Kap. 2.3.1: S. 11) des Dachumrisses digitalisiert, die Information über die Dachform wird anschließend attributiv in den Fachdaten vermerkt (vgl. Abb. 68: S.73).

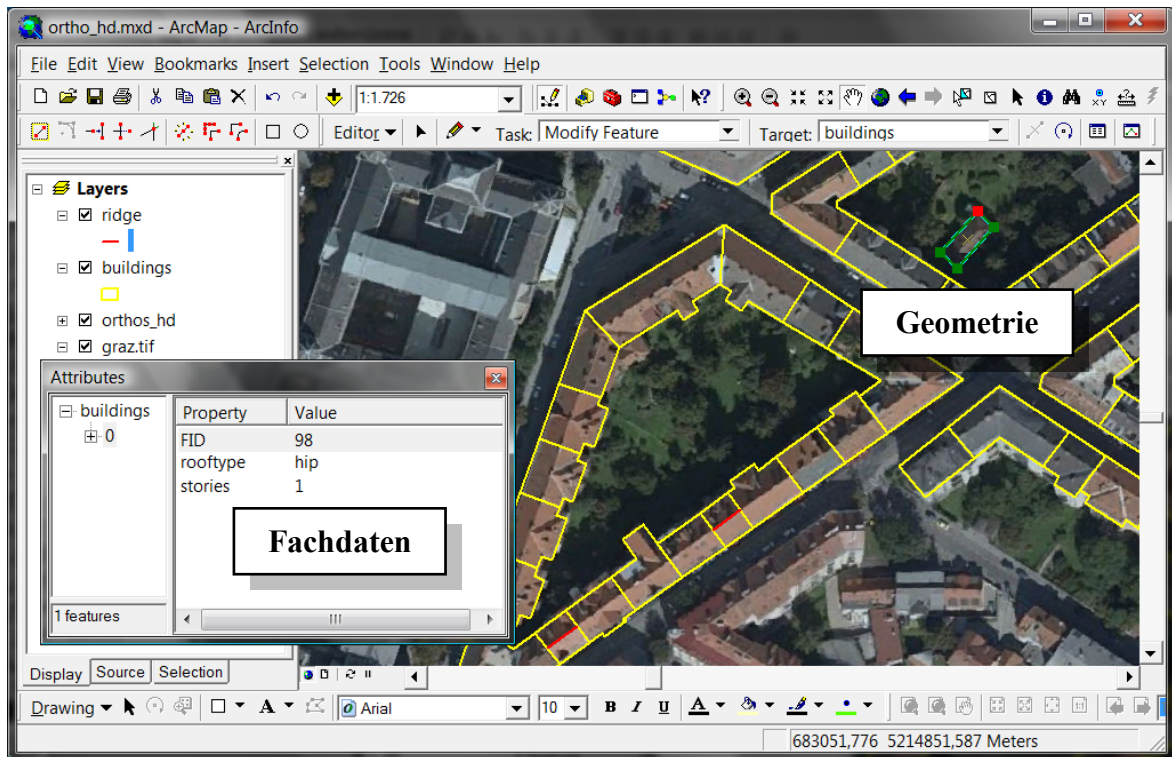


Abb. 68: Erstellung des verfahrensbezogenen Modelles der Dachlandschaft

Für beide Modellkategorien ist die Geometrie der Figur des Umrisses frei definierbar, bei vordefinierten Modellen muss jedoch die Topologie der verfügbaren parametrisierten Grundrisse beachtet werden. Es können beliebig ausgedehnte und abgewinkelte (schiefachsige) Figuren erstellt werden, solange dabei Anzahl sowie gegenseitige Lagebeziehungen der Vertices eingehalten werden. Keine Beschränkungen der Topologie existieren hingegen bei Individualmodellen, auch Löcher können eingefügt werden, wodurch komplizierte Grundrisse genau erfassbar sind (vgl. Abb. 69: S. 74). Wie bereits erwähnt können diesem Modelltyp allerdings nur Flachdachformen zugewiesen werden. Um Gebäudeabbilder mit anderweitigen Dachformen auszustatten müssen diese als parametrisiertes Modell erzeugt werden, wobei allerdings nur im Rahmen bestimmter Kombinationen aus Grundriss und Dachform modelliert werden darf (vgl. Tab. 4: S.73):

Dachform	Parametrische Grundrisse	Prismatischer Grundriss
Flachdach	Alle Typen	Ja
Sattel-, Walmdach	Quad, L-, T-, U_Shape, Quad_1_Quad	Nein

Tab. 4: Im Verfahren erlaubte Kombinationen aus Grundriss und Dachform

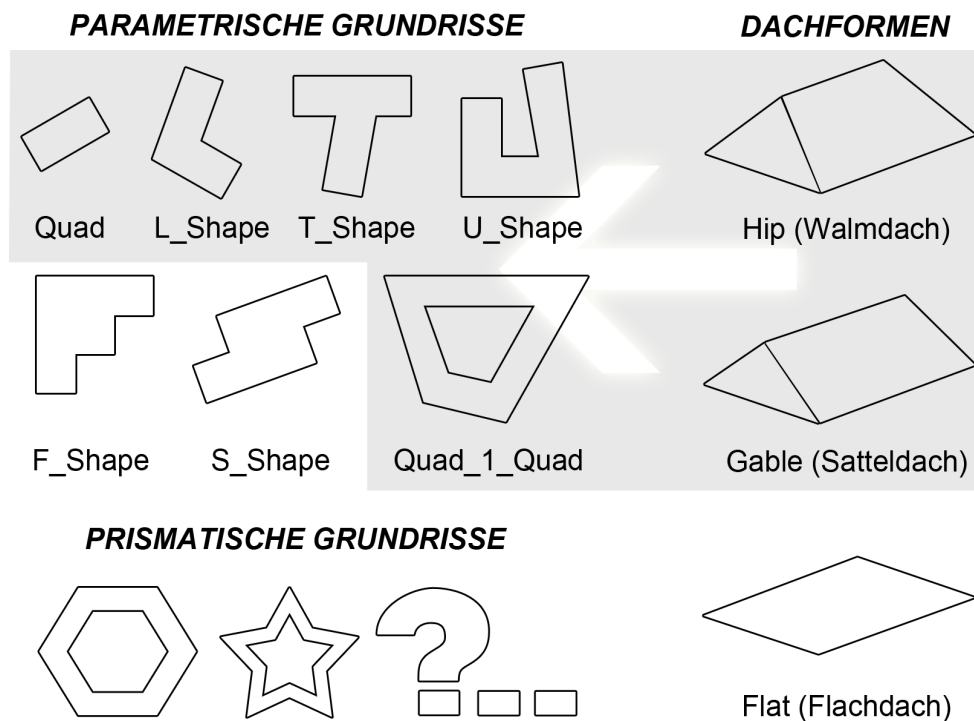


Abb. 69: Im Verfahren zur Verfügung stehende Grundriss-/Dachform-Kombinationen

Es hat sich gezeigt, dass durch die praktisch unendliche Anzahl an Dachkonstruktionen bei der Auswahl der Modellkategorie und der Einpassung der Features mitunter manipulierend in die Modellerstellung eingegriffen werden muss um trotz der so ebenen beschriebenen Beschränktheit von verfügbaren Kombinationen ein möglichst optimales Ergebnis zu erzielen. Soll z.B. Gebäude B (vgl. Abb. 70: S. 75) modelliert werden, würden die Fakten für ein Prototypenmodell bestehend aus einem parametrisierten, L-förmigen Grundriss und der Dachform Satteldach sprechen. Betrachtet man das daraus resultierende Modell, ist eine große Ähnlichkeit mit dem Modell des Gebäudes A festzustellen, obwohl eher der Charakter des Gebäudes C angestrebt werden sollte. Aufgrund der ungleich vorspringenden Dachtraufen, die sich nicht im Katalog wiederfinden, ist nun der Zeitpunkt erreicht, dass es dem Prototypenmodell an der Fähigkeit mangelt eine bestimmte Dacheigenschaft abzubilden.

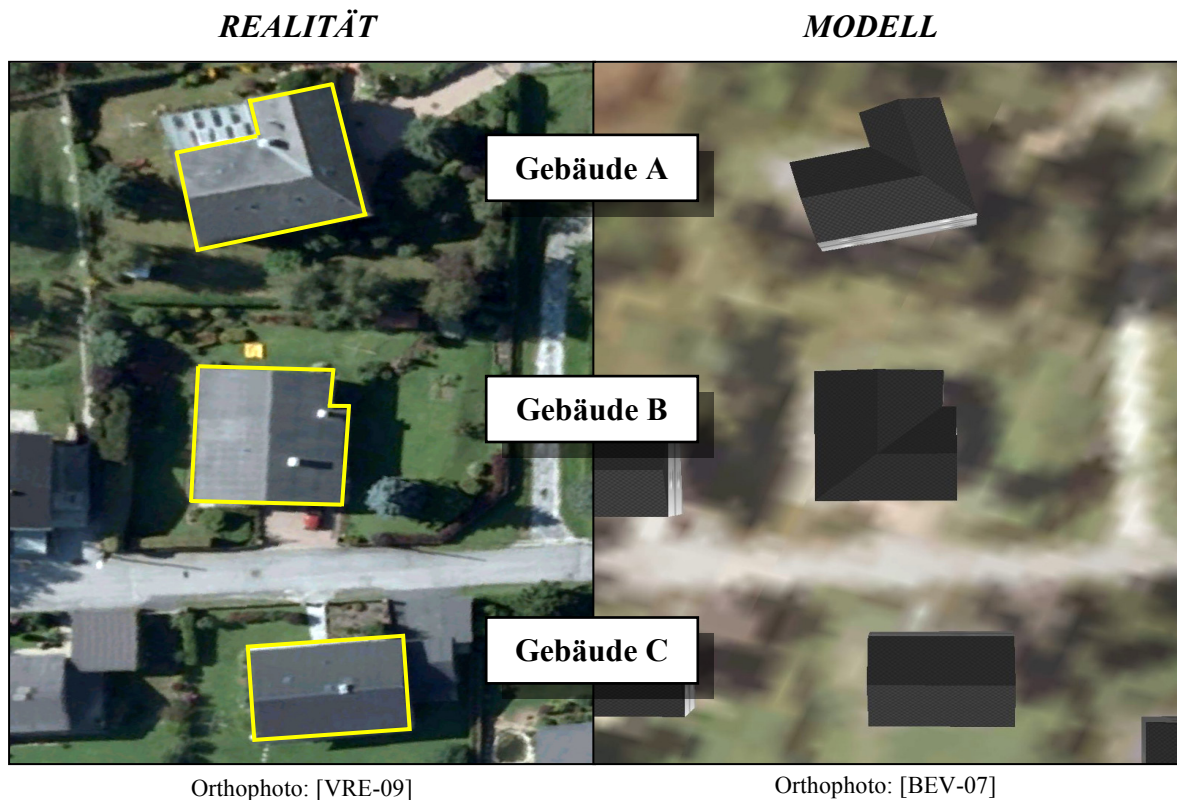


Abb. 70: Nicht getreue Abbildung der Realität infolge der beschränkten Möglichkeiten eines Prototypenmodelles

Es liegt letztendlich im Ermessen des Benutzers, ob bei der Digitalisierung bewusst solche typverzerrende Grundriss-Erweiterungen unterschlagen werden, um mit den zurzeit verfügbaren Prototypen bestmöglich der dominanten Charakter des Grundrisses einzufangen. Grundsätzlich kann dazu folgende Empfehlung abgegeben werden:

- Solange es sich, wie bei Gebäude D (vgl. Abb. 71: S. 76), nur um minimale Veränderungen des Grundrisses in Relation zur Gesamtfläche handelt, kann von einer angebrachten Variante gesprochen werden um der Beschränktheit entgegenzuwirken.
- Im Fall von Gebäude E zeigen sich jedoch bereits gravierende Abweichungen und es gilt die Empfehlung den Grundriss bestmöglich aufzunehmen. Wenngleich das so erzeugte Abbild doch sehr von der Realität abweicht, so ist damit prinzipiell die Möglichkeit offen gehalten, im Nachhinein neue Prototypen in das Verfahren einzufügen ohne die Datengrundlagen neu auswerten zu müssen.

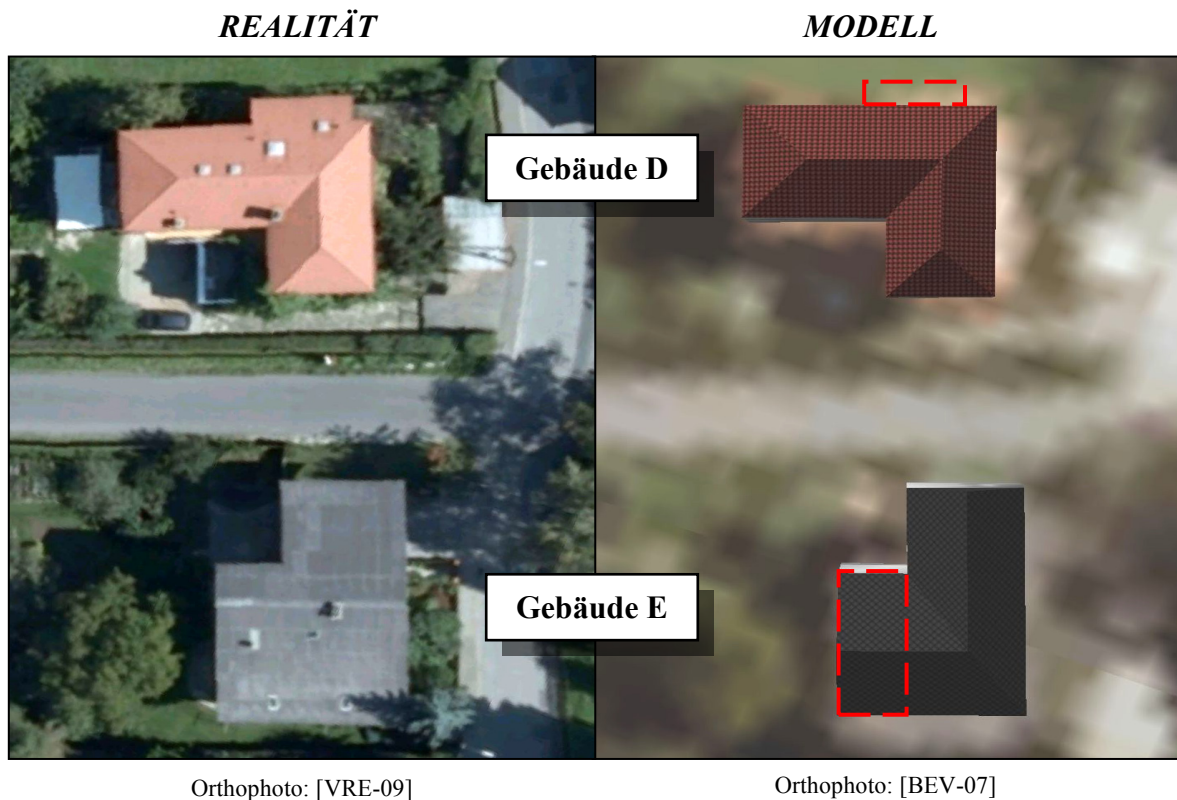
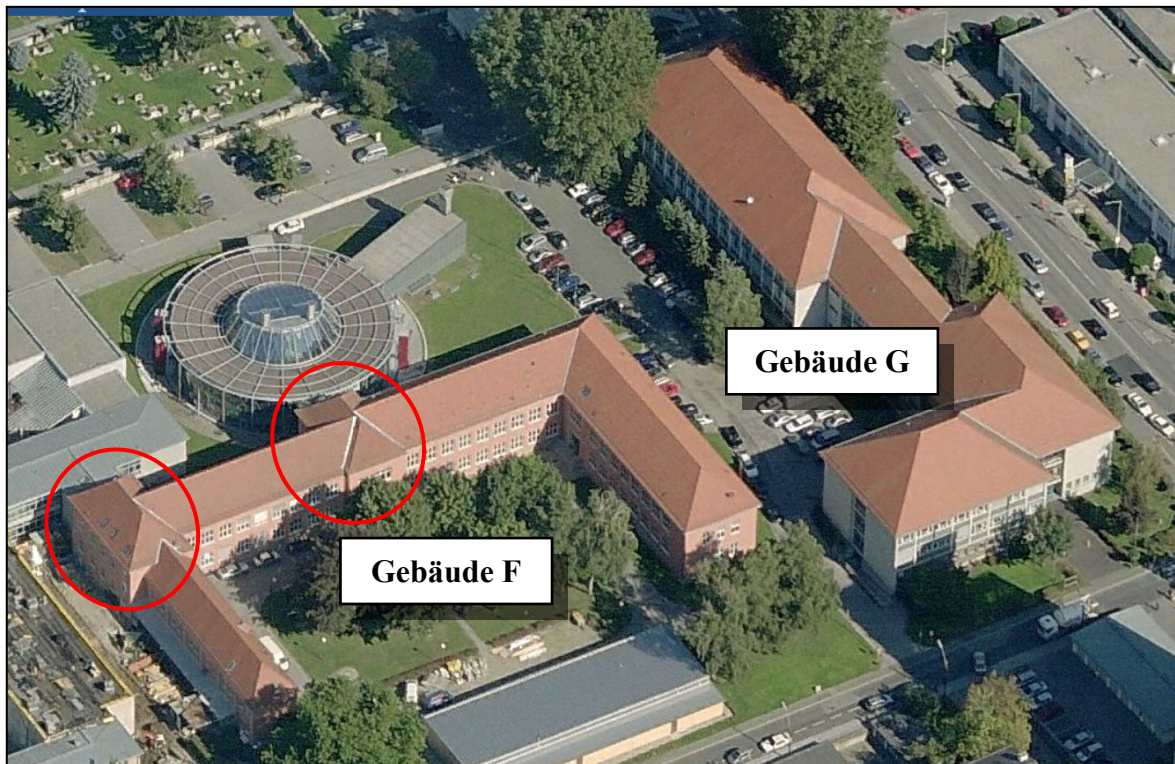


Abb. 71: Bewusste Manipulation der Abbildung zur Umgehung der Beschränktheit eines Prototypenmodelles

Größtenteils erfordern komplexe Grundrisse der abzubildenden Objekte mangels geeigneter Prototypen den Einsatz eines Individualmodelles. Sind dabei Dachformen abseits des Flachdaches aufzunehmen, kann es mitunter angebracht sein durch Wahl eines dachformfreundlicheren Prototypen teilweise Abstriche bei der Übereinstimmung mit dem Grundriss in Kauf zu nehmen, dafür aber eine passendere Dachkonstruktion abliefern zu können. Im Fall von Gebäude F (vgl. Abb. 72: S. 77) gehen zwar im Modell punktuelle Details wie z.B. die Stieghäuser verloren, der grundlegende Charakter von Grundriss und Dachform bleibt jedoch gewahrt. Diese Strategie kann natürlich nur soweit verfolgt werden, als dass die Möglichkeit eines adäquaten Einsatzes der verfügbaren Prototypen überhaupt besteht. Gebäude G weist durch seinen verworrenen Grundriss eine derart komplexe Dachkonstruktion mit unterschiedlichen Firsthöhen auf, dass diesem ein L-förmiger Walmdachprototyp (wie der des Gebäudes D) einfach nicht gerecht werden würde. Somit liegt in diesem Fall das Optimum darin zumindest den Grundriss in Form eines prismatischen Modelles genau abzubilden.



 **Stiegenhaus**

Luftbild: [VRE-09]

Abb. 72: Bewusste Manipulation der Abbildung zur Umgehung der Beschränkung eines Individualmodelles

Um auf zwei Spezialfälle bei Giebeldächern eingehen zu können lassen sich neben den Grundrissen bei Bedarf auch Firstlinien digitalisieren (vgl. Abb. 73: S. 78):

- Versetzen des Firstes um asymmetrische Satteldächer abbilden zu können
- Wenden des Firstes, der Dachgiebel wandert dadurch von der kurzen zur langen Seite im Grundriss.

Firstlinien werden zurzeit nur für die Prototypenkombination aus Satteldach mit Quad, L_Shape oder U_Shape unterstützt.

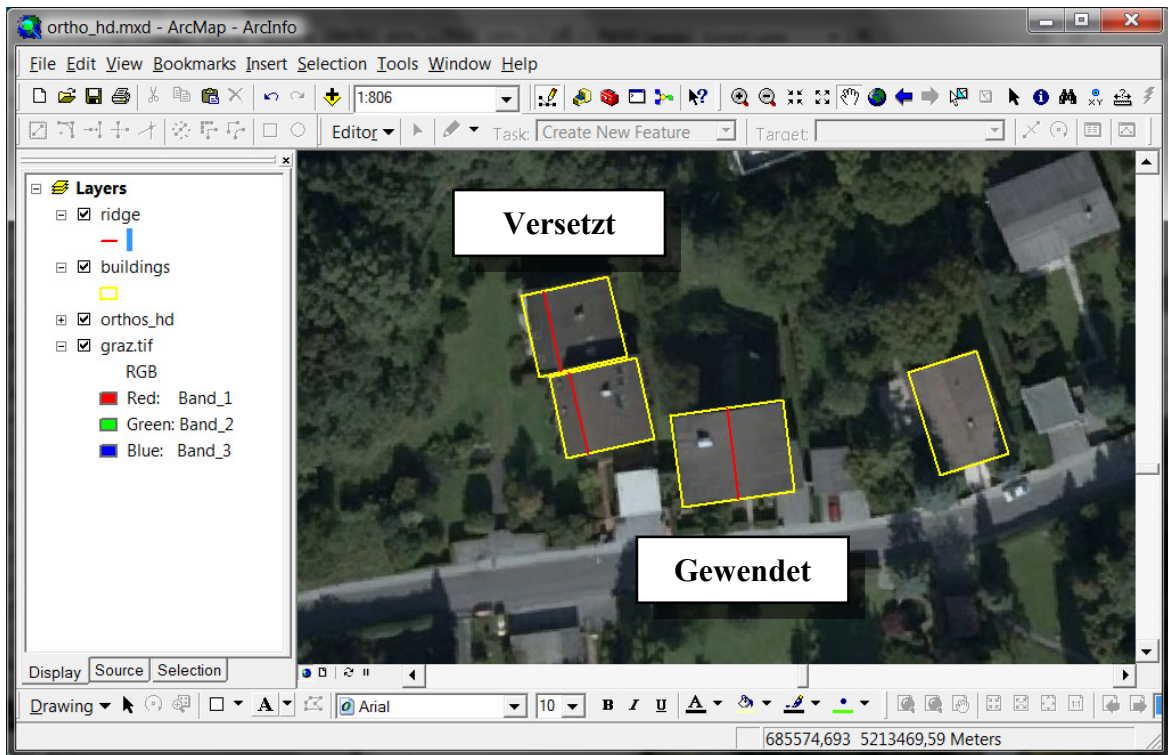


Abb. 73: Optionale Adaptierung der Firstlinien

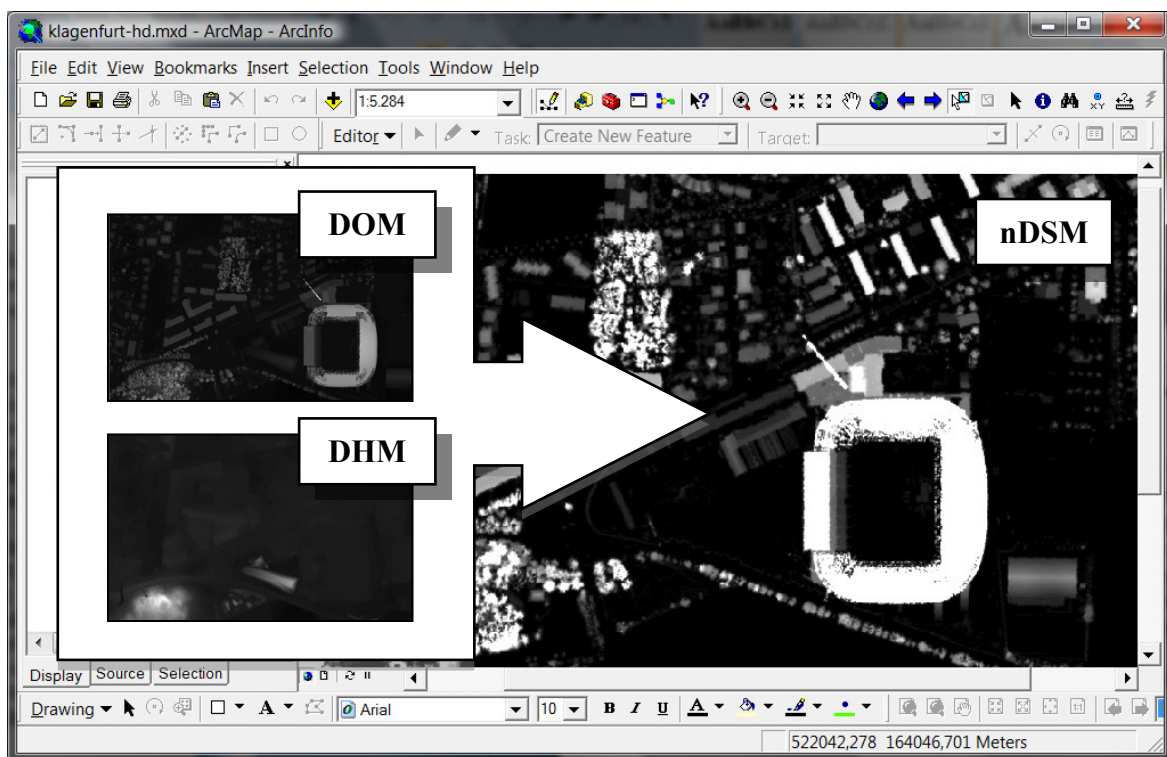
4.3.2 Vervollständigung der Modellparameter

Für all jene Features, die nicht im prismatischen Sinne digitalisiert wurden, muss der Dachformtyp bestimmt werden. Wird dieser Vorgang nicht während, sondern erst nach der fertigen Digitalisierung durchgeführt, kann ein automatisierter Analyseprozess zur Attributierung von Gebäuden mit Flachdächern eingesetzt werden. Die verbleibende, manuelle Interpretation der Dachformen für die anderweitigen Features wird somit beschleunigt, weiters kann eine Ermittlung der Traufenhöhe erfolgen, die ebenfalls in den Fachdaten vermerkt wird (vgl. Abb. 74: S. 82):

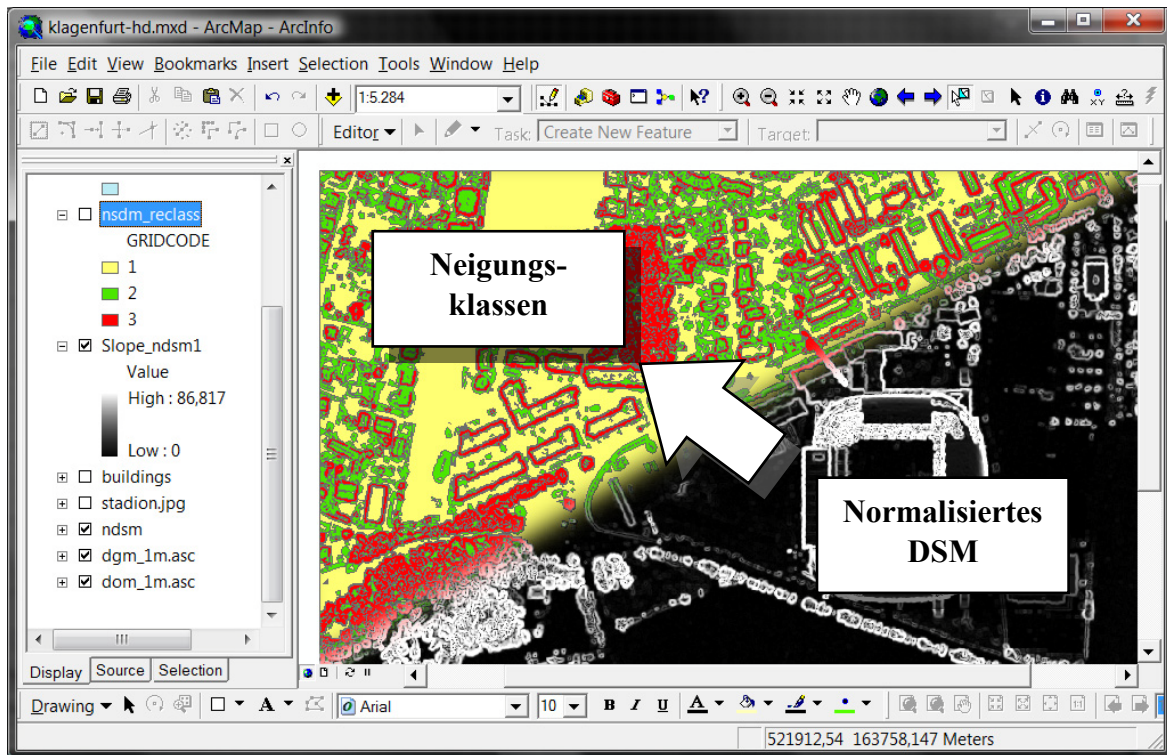
- Aus den beiden Höhenmodellen der ALS-Erhebungen (DOM, DHM) wird durch Subtraktion ein normalisiertes DSM mit relativen Höhenwerten erzeugt.
- Die Höhenangaben des nDSM dienen im nächsten Schritt zur Ableitung von Neigungswerten ($0 - 90^\circ$), welche den Klassen 1 bis 3: flach ($0 - 10^\circ$), mittel ($10 - 50^\circ$) und steil ($50 - 90^\circ$) zugeordnet werden.
- Die Neigungsklasse flach wird nun mit den Grundrissen der Features verschnitten um die weitere Analyse auf die dachrelevanten Gebiete zu beschränken.

- d. Anschließend werden sowohl für die verschnittene Neigungsklasse flach als auch für die Grundrisse die Flächeninhalte berechnet und die Ergebnisse zueinander in Relation gesetzt. Liegt der flächenmäßig normalisierte Deckungsgrad über dem Faktor 0,3, wird von einem Flachdach ausgegangen.
- e. Zum Schluss lässt sich mithilfe der Geostatistik die ungefähre Traufenhöhe aus den gemittelten Höhenwerten eines Grundrisses ermitteln.

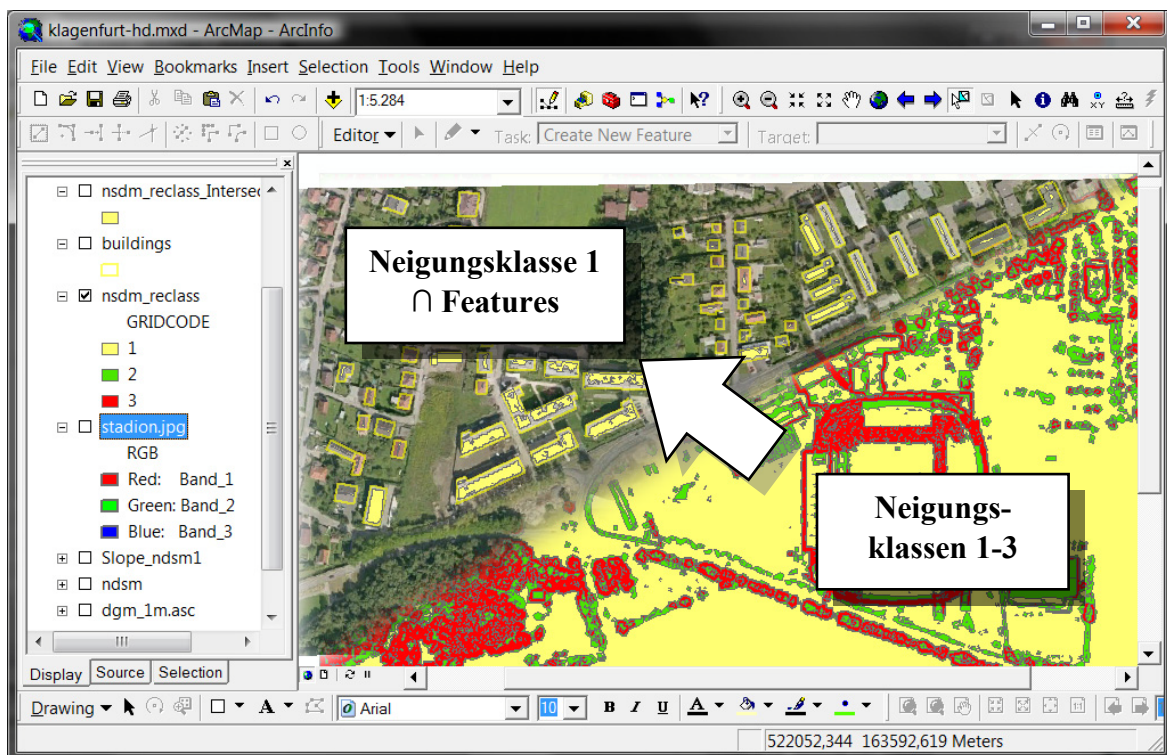
Wie bereits erwähnt, gab es Schwierigkeiten für das UG Graz Geodaten zu beziehen, die Analyse der Höhendatensätze wird deshalb am Beispiel eines UG in Klagenfurt demonstriert. Die verwendeten Datensätze wurden über KAGIS, das Geographische Informationssystem der Kärntner Landesregierung, bezogen, da freundlicherweise ein Demodatensatz zur freien Verfügung steht [KAG-09]. Für das UG Graz musste mangels vorliegender Höhenwerte somit eine Adaption des verfahrensbezogenen Modelles vollzogen werden, die Traufenhöhe wurde durch die Stockwerksanzahl ersetzt und in Folge aus Schrägluftbildern geschätzt, als Stockwerkshöhe wird in weiterer Folge ein Wert von 4 m angenommen.



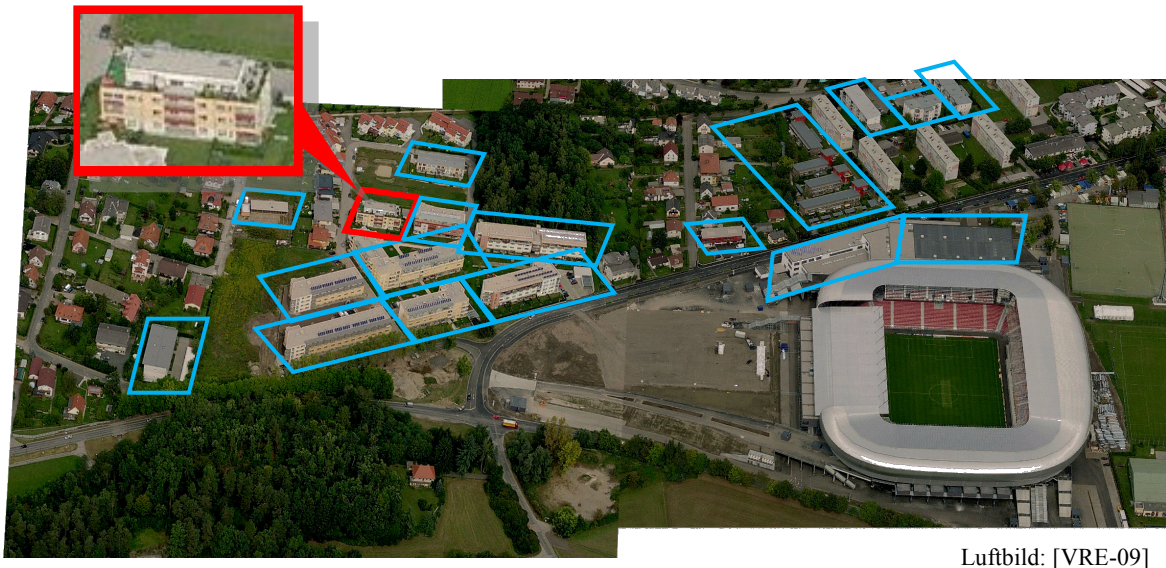
Schritt a.)



Schritt b.)



Schritt c.)



Durch visuelle Interpretation ermittelte Flachdachgebäude

Abb. 74: Ablauf des Analyseprozesses zur Vervollständigung der Modellparameter

Der Vergleich des Resultats des Analyseprozesses mit dem der visuellen Interpretation von Schrägluftbildern zeigt, dass mit einer Ausnahme sämtliche Gebäude mit Flachdach innerhalb des UGs erkannt wurden.

4.4 Modellmigration

Das Ziel dieses Verfahrensschrittes ist die Überführung des verfahrensbezogenen Modelles in eine Vorstufe des darstellungsbezogenen Modelles um es für weitere Verfahrensschritte nutzbar zu machen.

Eingabe: Verfahrensbezogenes Modell

- Geobasisdaten Dachgrundrisse: 2D-Shapefile, Geometrietyp: Polygon
- Geofachdaten Dachform: dBASE-Format
- Geobasisdaten Firstlinien: 2D-Shapefile, Geometrietyp: Polyline

Ausgabe: Vorstufe des darstellungsbezogenen Modelles

- Visualisierungsdaten Dachgrundrisse mit Dachformattributen: 3D-Szenengraph-Format, Geometrietyp: Polyline
- Visualisierungsdaten Firstlinien: 3D-Szenengraph-Format, Geometrietyp: Polyline

Mittels eines Utility der für die Visualisierung zum Einsatz kommenden 3D-Bibliothek erfolgt eine Formatkonvertierung der Shapefiles in Szenengraph Dateien. Dies beinhaltet

auch einen strukturellen Eingriff in die Geometrie der Modelle, die in den spezifischen Anforderungen von Echtzeit-3D-Rendermethoden bzw. der Beispielapplikation begründet liegt. Das Dachflächenmodell muss außerdem für die bevorstehende Integration in ein 3D-Stadtmodell höhenmäßig angepasst werden.

4.4.1 Formatkonvertierung

Shapefiles stellen quasi den Dateiformat-Standard für Vektorgeodaten im Desktop-GIS-Bereich dar [WIK-09i]. Um außerhalb dieses Anwendungsbereiches auf die so gespeicherte Information zugreifen zu können, bedarf es zumeist einer Formatkonvertierung in andere Dateiformate, im Falle der Beispielapplikation dieses Verfahrens handelt es sich dabei um das visualisierungsorientierte Szenengraph-Format. Beide Dateiformate sind einfach aufgebaut, jedoch für unterschiedliche Anwendungsbereiche ausgelegt.

Das binäre Shapefile beschreibt geometrische Primitiva samt optionalen Attributangaben. Konkret handelt es sich hierbei um einzelne Dateien, die dem Benutzer innerhalb eines GIS jedoch als ein einzelner Datensatz präsentiert werden:

- Die geometrischen Angaben zu den Features finden sich in einer <name>.shp Datei, diese besitzt folgenden Aufbau:

CODE	KOMMENTAR
Fixed Header	DATENSATZ METADATEN
File code	Magic Number zur Dateiidentifikation
File length	Angabe der Dateigröße
Shape Type	Angabe des Geometrietyps
MBR	Angabe des Extent des Datensatzes
...	...
Features	FEATURES
Record header	FEATURE METADATEN
Record number	Feature-ID
Record length	Angabe der Datenstrukturgröße
Record	FEATURE GEOMETRIE
(0-4 Bytes, int32) Shape type	Angabe des Feature-Geometrietyps
(4- Bytes, double) Shape content	Feature-Extent, Angaben zum Primitive, Koordinaten: XY(ZM)
Record header...	NÄCHSTES FEATURE...

Quelle: in [WIK-09i]

- Die Angabe des Bezugssystems erfolgt gesondert im WKT-Format innerhalb der Datei <name>.prj:

CODE

```
PROJCS["MGI_M34",
  GEOGCS["GCS_MGI",
    DATUM["D_MGI",
      SPHEROID["Bessel_1841",6377397.155,299.1528128]],
    PRIMEM["Greenwich",0.0],
    UNIT["Degree",0.0174532925199433]],
  PROJECTION["Transverse_Mercator"],
  PARAMETER["False_Easting",750000.0],
  PARAMETER["False_Northing",0.0],
  PARAMETER["Central_Meridian",16.33333333333334],
  PARAMETER["Scale_Factor",1.0],
  PARAMETER["Latitude_Of_Origin",0.0],
  UNIT["Meter",1.0]
]
```

- Die attributiven Angaben zu den Features finden sich in der <name>.dbf dBASE Datei. Ohne auf den internen Aufbau dieses Dateiformates genauer eingehen zu wollen, kann festgehalten werden, dass die Zuordnung der Attribute zu einzelnen Features durch das Einhalten der gleichen sequentiellen Reihenfolge wie in <name>.shp ermöglicht wird.

Das Szenengraph-Format dient zur Beschreibung kompletter Visualisierungsszenen, bietet also neben der abstrakten Beschreibung von geometrischen und attributiven Eigenschaften auch die Möglichkeit der Zuordnung konkreter Darstellungsstile. Dafür anwendungsrelevante Beispiele wären etwa die Definition von Punktgrößen, Strichstärken, Farbfüllungen oder Texturen. All diese Angaben erfolgen innerhalb der Datei <name>.osg wie folgendes Beispiel zeigt:

CODE	KOMMENTAR
Group { num_children 2 ... Geode {	FEATURES Anzahl der Features im Datensatz ... FEATURE

<pre> description "224" UserData { osgSim::ShapeAttributeList { int "FID" 224 string "rooftype" "flat" int "stories" 2 } } Geometry { PrimitiveSets 1 { DrawArrays LINE_STRIP 0 5 } VertexArray Vec3Array 5 { 5150.1 2098.37 357.984 5162.25 2077.1 357.984 5187.69 2092.61 357.984 5175.28 2113.4 357.984 5150.1 2098.37 357.984 } ColorBinding OVERALL ColorArray Vec4Array 1 { 1 1 1 1 } } Geode { ... } </pre>	Feature-ID FEATURE ATTRIBUTE (optional) Feature-ID Dachform Stockwerksanzahl FEATURE GEOMETRIE Angabe des Feature Geometrietyps, Angaben zum Primitive Koordinaten: XY(Z) (Dieses Visualisierungsformat kennt kein Bezugssystem, Geometrie wird in ein einheitliches absolutes System überführt.) Darstellungsstil NÄCHSTES FEATURE
--	---

Die Formatkonvertierung erfolgt mithilfe des Werkzeuges OSGGIS, einer GIS-Erweiterung der 3D-Bibliothek. Durch die Unterschiedlichkeit der Anwendungsbereiche bedingt dieser Vorgang nicht einfach nur eine Transformation der Dateiformat-Schemata, sondern auch eine Anpassung der geometrischen Struktur um bestimmten Beschränkungen Genüge zu leisten. Die 3D-Graphikroutinen der heutzutage eingesetzten Hardware erlauben unter Einhaltung bestimmter Regeln eine sehr schnelle Verarbeitung, die zu visualisierenden Objekte dürfen dabei jedoch ausschließlich aus koplanaren, sich nicht selbst schneidenden Polygonen konvexer Form bestehen [WRI-07]. Es wäre höchst kompliziert, wenn auf diese Anforderungen während der Digitalisierung explizit eingegangen werden müsste, das Utility ist deshalb in der Lage für Features, deren

Grundrissformen diese Regeln verletzen, implizit eine Zerlegung in valide Teilpolygone durchführen. Eine derartige „Aufsplitterung“ des Grundrisses in eine unbekannte Anzahl einzelner Primitive würde jedoch den weiteren Verfahrensablauf unnötig verkomplizieren, als Lösung wird deshalb eine Umwandlung des Geometrietyps von Polygon in Linie vorgenommen, da für diesen Primitivtyp keinerlei Einschränkungen existieren. Innerhalb der Feature-Geometrie entsteht somit aus einem Polygonumriss ein Linienprimitiv, besitzt ein Feature infolge von Löchern im Grundriss sowohl einen äußeren als auch (mehrere) innere Polygonumrisse, schlägt sich dies in der Anzahl der Linienprimitive nieder (vgl. Abb. 75: S. 86).

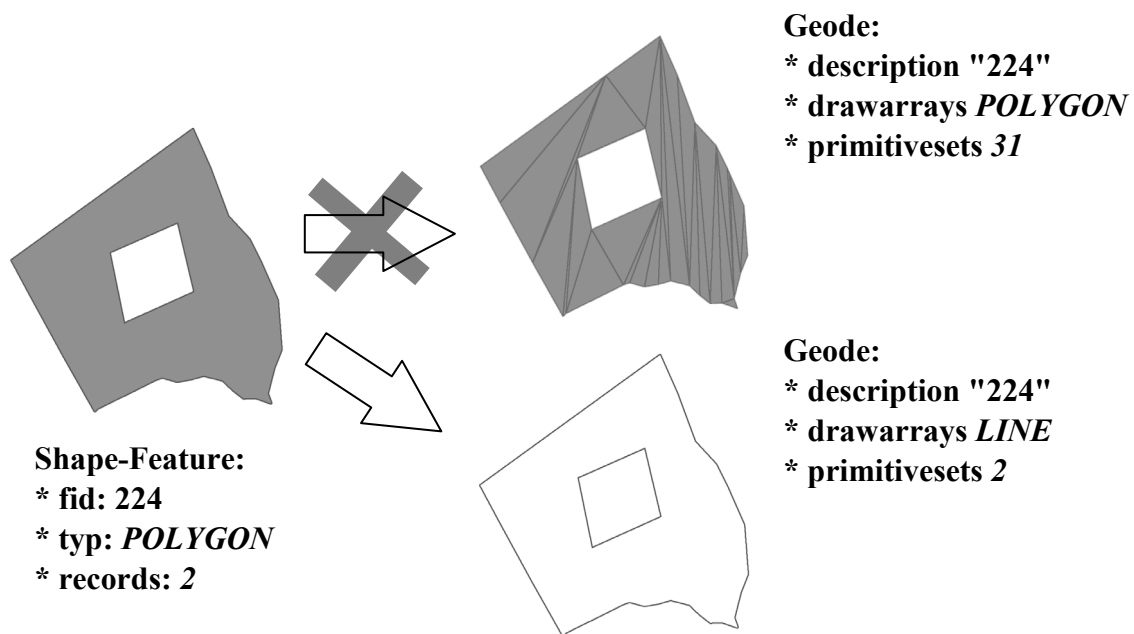


Abb. 75: Formatkonvertierung samt Änderung des Geometrietyps

4.4.2 Niveauadaption

Das Modell der Dachflächen soll in ein 3D-Stadtmodell eingegliedert werden, das die Objektgruppen Gelände, Vegetation und Gebäude beinhaltet. Zwar besteht durch die Georeferenzierung eine Deckungsgleichheit der Dachflächen im Rechts- und Hochwert, das Bezugsniveau des Geländes wurde aber bisher noch nicht mit einbezogen, wodurch sich das Modell später nicht auf der richtigen Höhe befinden würde. Während der Modellmigration adaptiert deshalb das Utility den Höhenwert eines jeden Dachflächenmodell-Vertices anhand der Summe aus entsprechender DGM-Höhe und den, in den Geofachdachten vermerkten, relativen Höhenoffset der Traufenhöhe (vgl. Abb. 76: S. 87).

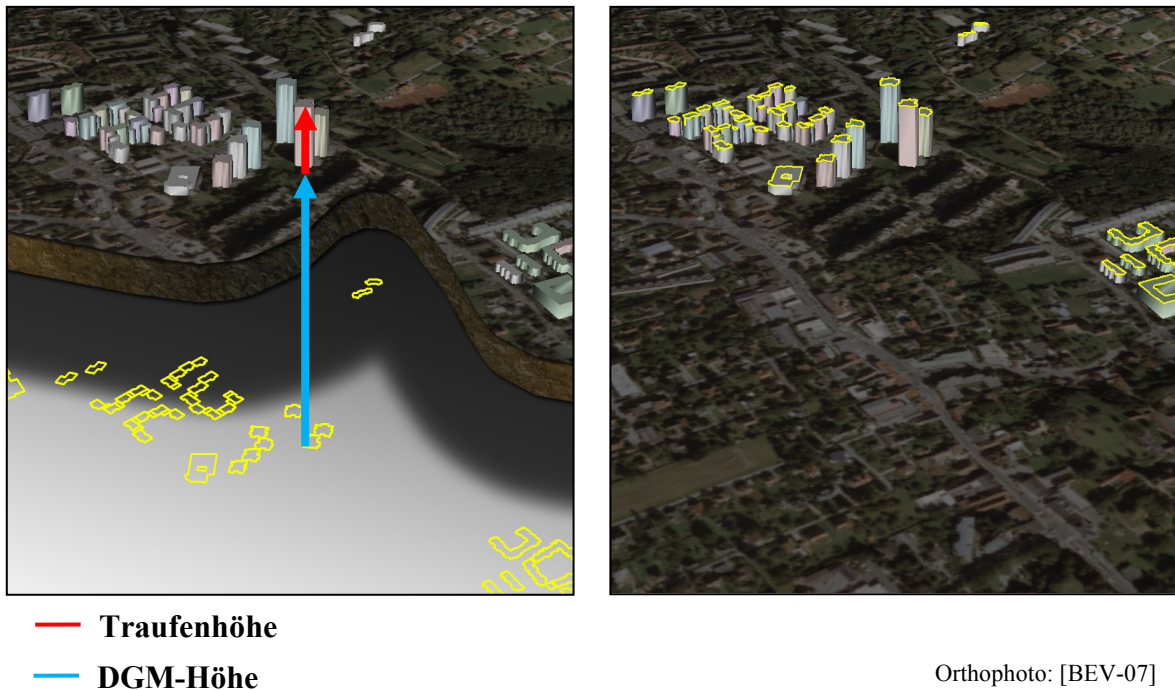


Abb. 76: Niveaueadaption des Dachflächenmodelles

4.5 Fertigstellung des darstellungsbezogenen Modelles

Das Ziel dieses Verfahrensschrittes ist die Finalisierung der Vorstufe des darstellungsbezogenen Modelles.

Eingabe: Vorstufe des darstellungsbezogenen Modelles

- Visualisierungsdaten Dachgrundrisse mit Dachformattributen: 3D-Szenengraph-Format, Geometrietyp: Polyline
- Visualisierungsdaten Firstlinien: 3D-Szenengraph-Format, Geometrietyp: Polyline

Ausgabe: Darstellungsbezogenes Modell

- Visualisierungsdaten Dachflächenmodell mit Darstellungsstilen: 3D-Szenengraph-Format, Geometrietyp: Polygon

Mittels der Beispielapplikation soll aus den Grundrissen und den bisher nur attributiv vermerkten Dachformtypen ein polygonales Dachflächenmodell entstehen. Dies erfordert die geometrische Konstruktion noch ausstehender Dachflächen-Vertices mit Hilfe einer einfachen Dachausmittlung, die Bildung von dachflächen-repräsentierenden Primitiven sowie die Zuweisung von Darstellungsstilen um dem Anwendungsbereich Visualisierung gerecht zu werden.

4.5.1 Datenimport

Als erster Schritt jeglicher Manipulation erfolgt das Einlesen der Eingabedaten in eine größenvariable Datenstruktur. Diese soll einen wahlfreien und bequemen Zugriff auf einzelne Elemente gestatten, da dies in den folgenden Prozessschritten noch oft erforderlich sein wird. Zur Elementidentifikation bietet sich die eindeutige Feature-ID an:

CODE	KOMMENTAR
<pre>struct FetchedPolygon { osg::ref_ptr<osg::Geometry> geometry; osg::ref_ptr<osg::Vec3Array> vertices; std::vector< osg::ref_ptr<osg::PrimitiveSet> > primitiveSets; }; typedef std::map< const unsigned int, FetchedPolygon> FetchedPolygons;</pre>	BASIS-FEATURE DATENSTRUKTUR Vektornormalen, Texturkoordinaten, Farbwerte Koordinaten: XYZ Angaben zum Primitiv Feature-ID
<pre>struct Roof: public FetchedPolygon { enum ShapeTypes {UNRECOGNIZED, QUAD, L_SHAPE, F_SHAPE, T_SHAPE, U_SHAPE, S_SHAPE, QUAD_1_QUAD}; ShapeTypes* shapeType; enum RoofTypes {FLAT, HIP, GABLE}; RoofTypes roofType; enum MaterialTypes {CLAY, ETERNIT, COPPER, PLATE, ALUMINIUM, STAINLESS}; MaterialTypes materialType;</pre>	DACH-FEATURE DATENSTRUKTUR Grundrisstypen Dachformtypen Darstellungsstile

<pre>int* wellDefinedOffset; int* synchronOffset; };</pre>	Grundriss-Bezugsvertex
<pre>typedef std::map<const unsigned int, Roof> Roofs;</pre>	Feature-ID

Während des Imports können den meisten Datenelementen keine Werte zugeordnet werden, da diese noch unbekannt sind. Zu Dachformtyp sowie Koordinaten und Primitiven liegen zwar bereits Angaben vor, diese sind jedoch noch nicht überprüft bzw. unvollständig. In den nun folgend vorgestellten Prozessen wird gezeigt, wie diese Datenstruktur Schritt für Schritt ergänzt wird um daraus das finale darstellungsbezogene Modelle ableiten zu können.

4.5.2 Parametervalidierung

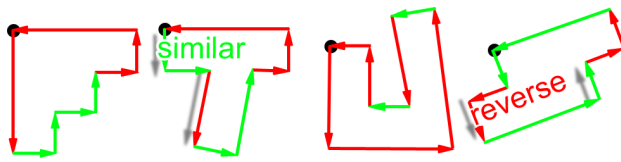
Nach dem Import gilt es die Modellkategorie und ggf. den spezifischen Prototypen eines jeden Features zu überprüfen. Dieser Schritt ist deshalb essentiell, da wie bereits bekannt sowohl Prototypen- als auch prismatische Modelle Einschränkungen in Bezug auf mögliche Kombinationen aus digitalisiertem Grundriss und zugeteilter Dachform unterliegen. Bevor also ein entsprechendes Dachflächenmodell anhand dieser Parameter konstruiert werden kann, muss zuerst deren Gültigkeit ermittelt werden um in den weiteren Prozessschritten nicht Gefahr struktureller Modellierungsfehler zu laufen. Im Gegensatz zu den explizit zugewiesenen Dachformtypen ist die Modellkategorie der Grundrisse nicht attributiv vermerkt, sondern implizit durch die Art der Digitalisierung festgelegt worden und muss nun durch einen Prozess analysiert werden. Anhand der Betrachtung der Anzahl von Vertices und Primitive eines Features werden zuerst potentielle Kandidaten prototypenbasierter Grundrisse ausgesiebt (vgl. Tab. 5: S. 89):

Anzahl der Vertices	Anzahl der Primitive	Möglicher parametrisierter Grundrisstyp
4	1	Quad
6	1	L_Shape
8	1	F-, T-, U-, S_Shape
8	2	Quad_1_Quad

Tab. 5: Vorselektion potentieller Features mit vordefinierter Grundrisstypen

In weiterführenden Tests wird versucht die soeben getroffenen Annahmen durch typspezifische Kontrollen zu bestätigen bzw. weitere Unterscheidungen zu treffen. Schlagen diese fehl, wird das Feature als prismatisches Modell (Grundrisstyp:

Unrecognized) eingestuft. Ein Test zur Unterscheidung von F-, T-, U- bzw. S_shapes soll nun erläutert werden:



Signaturen eines Richtungsvergleiches der Kantenpaare Edge(i) und Edge(i + 2) für den Startpunkt •. Hervorgehoben sind die spezifischen Merkmalsmuster der jeweiligen Figur.

reverse	similar	reverse	similar
similar	similar	reverse	reverse
similar	reverse	reverse	reverse
similar	similar	similar	similar
similar	similar	reverse	similar
reverse	reverse	similar	reverse
reverse	reverse	reverse	reverse
reverse	reverse	reverse	similar

Abb. 77: Untersuchung potentieller F-, T-, U-, oder S-Shapes

Um den genauen Grundrisstyp eines Features bestimmen zu können, wird nach geometrischen Merkmalen gesucht, die möglichst einmalig auf die jeweilige Figur zutreffen. In diesem Fall stellt das Resultat eines Richtungsvergleiches bestimmter Kantenpaare des Grundrisses ein solches Merkmal dar. Durch die Überprüfung der Ausrichtung sämtlicher Kanten einer Figur kann deren Signatur ermittelt werden, in dieser wird dann nach den spezifischen Merkmalsmustern Ausschau gehalten (vgl. Abb. 77: S. 90). Die Muster sind so gewählt, dass sie präfixfrei sind, d.h. die Signaturaufnahme kann an jeder beliebigen Kante gestartet werden ohne Auswirkungen auf das Resultat befürchten zu müssen.

Dieser Test ist einfach zu implementieren und performant, in den Testreihen des Verfahrens hat sich jedoch gezeigt, dass der Ansatz des Richtungsvergleiches bei einigen schiefwinkligen Figuren versagen kann. So werden im UG1 bestimmte Eckgebäude der Baublöcke, die als U_Shape digitalisiert wurden, dem falschen Grundrisstyp zugeordnet bzw. als prismatisches Modell eingestuft. Um im Zuge der Dachausmittlung für diese Features keine fehlerhaft konstruierten Dachflächen zu erhalten, mussten ihnen kurzerhand Flachdächer zugeteilt werden. Für die restlichen Gebiete, in denen prototypenbasierte Grundrisse beinahe ausschließlich in orthogonaler Ausführung anzutreffen sind, zeigt sich ein robustes Verhalten mit einwandfreier Erkennungsrate (vgl. Abb. 78: S. 91).

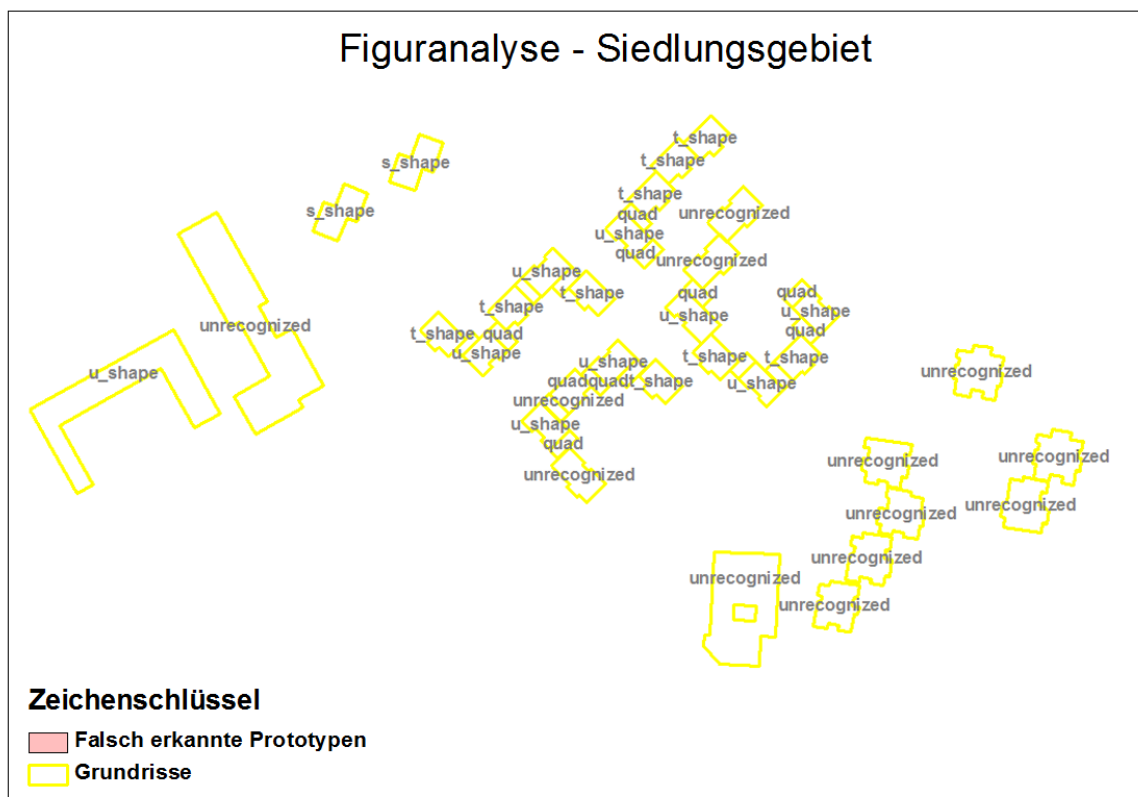
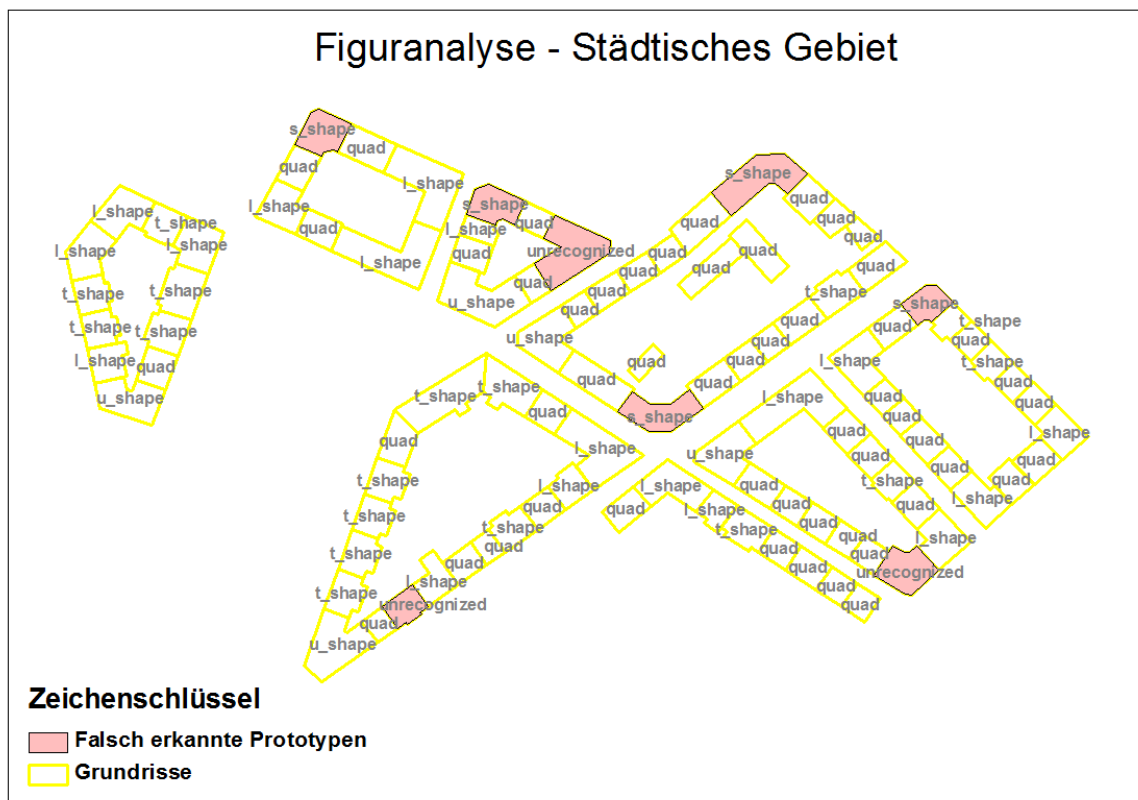


Abb. 78: Ergebnisse verfahrensinterner Testreihen zur Beurteilung der Grundrisstyp-Analysen

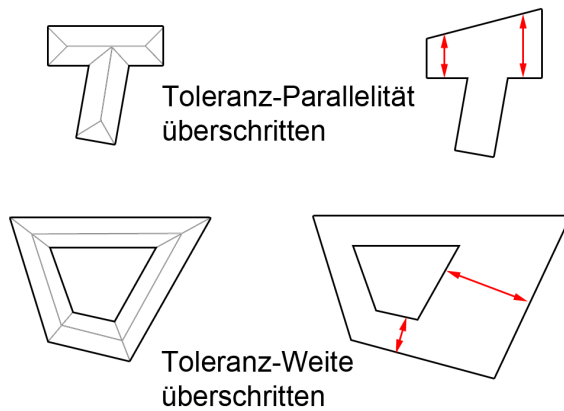


Abb. 79: Kontrolle bestimmter geometrischer Eigenschaften innerhalb der Grundrisse

Sobald die Typen von Dachform und Grundriss bekannt sind, kann der eigentliche Validierungsprozess beginnen. Dieser führt neben der obligatorischen Kontrolle der erlaubten Typkombinationen auch eine Überprüfung bestimmter geometrischer Eigenschaften der Grundrisse durch (vgl. Abb. 79: S. 92). Werden definierte Toleranzmaße überschritten, wird die derzeit zugewiesene Dachform des Features durch ein Flachdach ersetzt – dies soll verhindern, dass optisch unstimme Dachkonstruktion erstellt werden.

4.5.3 Konstruktion der Dachflächen

Durch die Validierung ist sichergestellt, dass die Features einen beschränkten Satz definierter Dachkonstruktionen aufweisen, im Falle der derzeit definierten Prototypen genügt bereits ein einfacher Ansatz der Dachausmittlung zur Konstruktion der Dachflächen. In erster Linie regelt dabei die zugewiesene Dachform, ob die bereits bekannten Vertices des Grundrisses zur Bildung der Dachflächen ausreichen, wie dies z.B. bei Flachdächern der Fall ist.

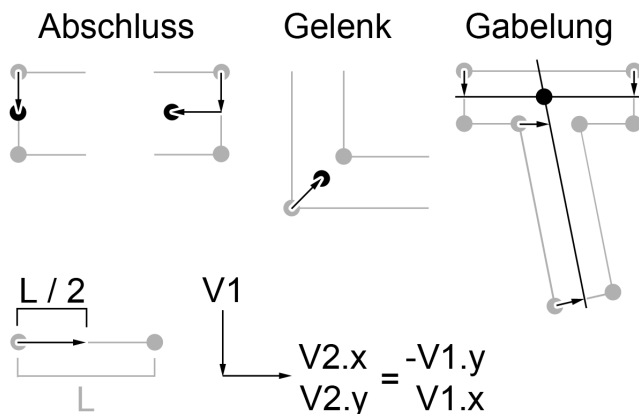


Abb. 80: Positionsermittlung für Firstvertices

Bei davon abweichenden Dachformen muss die Position der Dachfirste bestimmt werden, die dazu notwendigen Koordinatenberechnungen der diesbezüglichen Vertices lassen sich je nach ihrer Position innerhalb des Firstes auf drei unterschiedliche Rollen reduzieren (vgl. Abb. 80: S. 92):

- Abschlussvertex
- Gelenkvertex
- Gabelungsverte

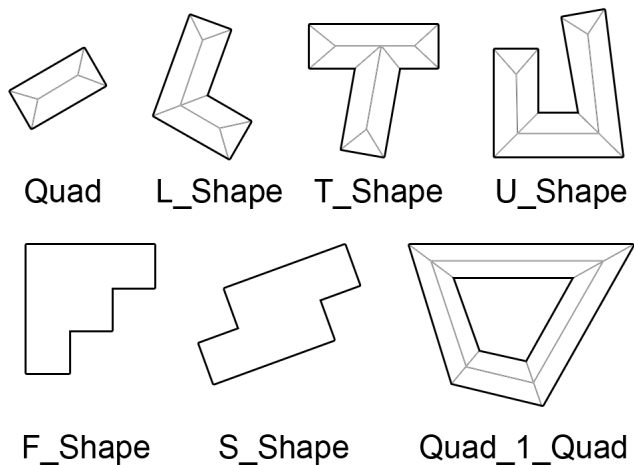


Abb. 81: Abbildung der ausgemittelten Grundrisstypen

Ein grundrisstyp-spezifischer Katalog (vgl. Abb. 81: S. 93) gibt über Anzahl und Rollen der Firstvertices in einem Grundriss Auskunft, die so berechneten Vertices werden im Anschluss in die Liste der bereits bekannten Grundrissvertices eines Features eingereiht. Wurden im Zuge der Digitalisierung für Features eigene Firstlinien erhoben, können diese anhand der FID zugeordnet und in den Vorgang der Dachausmittlung miteinbezogen werden. Liegen keine Firstlinien vor, wird der Giebel (Abschluss) wie üblich an der kurzen Stirnseite eingerichtet (vgl. Tab. 6: S. 93).

Grundrisstyp	Abschlussvertex	Gelenkvertex	Gabelungvertex
Quad	V5, V6		
L_Shape	V7, V9	V8	
U_Shape	V9, V12	V10, V11	
T_Shape	V9, V10, V11		V12
Quad_1_Quad		V9, V10, V11, V12	

Alle anderen Grundrisstypen können zurzeit nur mit Flachdächern kombiniert werden (vgl. Kap. 4.3.1: S. 72).

Tab. 6: Katalog der Firstvertices

Die nachfolgend zum Einsatz kommende 3D-Bibliothek wird das B-Rep Darstellungsprinzip anwenden, dabei stellen Vertices rein abstrakte Positionsangaben dar (vgl. Kap. 3.3.2: S. 43), die graphische Repräsentation eines Objektes ist erst dann gegeben, wenn geometrische Primitiva durch diese Punkte aufgespannt werden. Ähnlich der Formatkonvertierung muss nun bei der Definition der dachflächen-repräsentierenden Primitive darauf geachtet werden, ausschließlich koplanare Polygone in konvexer Form zu bilden. Polygone, die Flachdächer darstellen, werden deshalb durch denselben automatisierten Algorithmus zerlegt, der schon bei der Modellmigration zum Einsatz kam, die Dachflächen aller anderen Dachformen können aufgrund ihrer bekannten Eigenschaften selbstständig aufgegliedert werden. Die Primitivebildung erfolgt ähnlich der Verticesberechnungen, auch hier gibt ein grundrisstyp-spezifischer Katalog Anzahl und Art bestimmter vordefinierter Erstellungsmuster vor, die sich zur Bildung von Dachflächen herauskristallisiert haben. Die Muster definieren jeweils für einzelne Dachflächentypen, welche Vertices ein Primitive aufspannen, dabei ist es wichtig die Auflistung entgegen

dem Uhrzeigersinn anzugeben, da sich dadurch Vorder- und Rückseite eines Polygons definieren lassen (vgl. Abb. 82: S. 94).

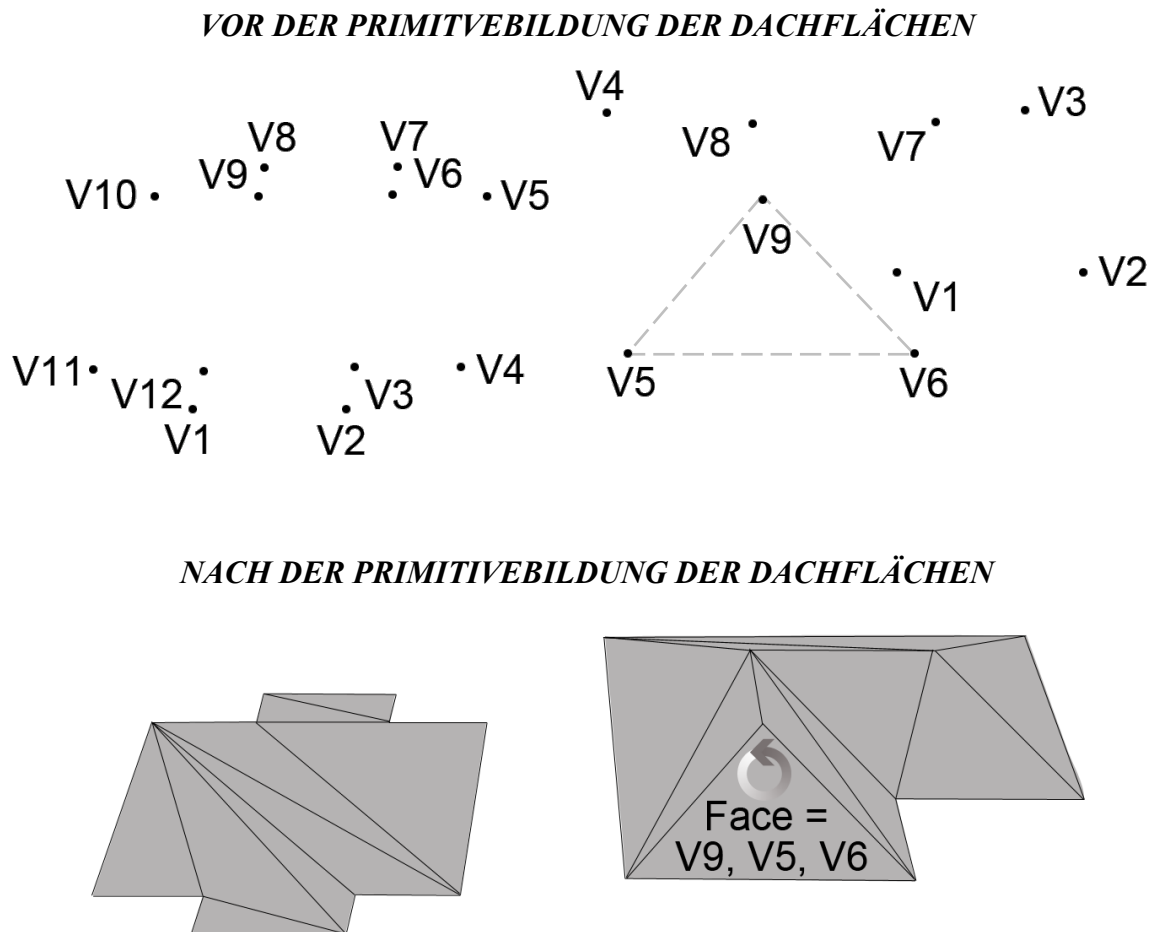


Abb. 82: Erstellung der Dachflächenprimitive

4.5.4 Zuweisung von Darstellungsstilen

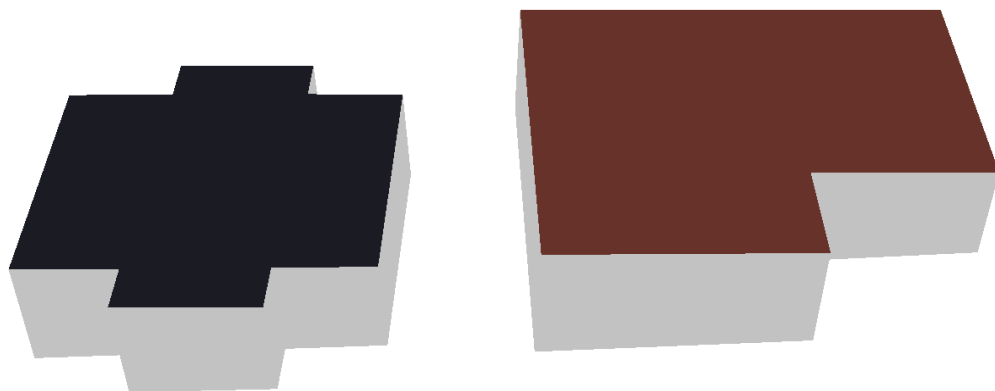
Würden die Features zum jetzigen Zeitpunkt mit anderen Objektgruppen eines 3D-Stadtmodelles, wie z.B. den Gebäudetorsi, visualisiert werden, könnten einzelne Gruppen innerhalb des Modelles nur sehr schwer ausgemacht werden, der Einsatz von Darstellungsstilen, sprich der graphischen Variablen nach Bertin wie Farbe, Helligkeit und Muster, ist deshalb für den Anwendungsbereich Visualisierung unumgänglich. Als Stil wird dabei ein Konglomerat aus Grundfarbe und Textur bezeichnet, die hier vollzogene diskrete Aufteilung in einzelne Komponenten erlaubt eine größere Flexibilität, wie später noch gezeigt wird. Bevor genauer darauf eingegangen wird, soll angemerkt werden, dass die im Modell gezeigten Darstellungsstile zufällig festgelegt wurden und keinerlei Übereinstimmung mit der Realität aufweisen. Sie dienen der beispielhaften Visualisierung

der Dachflächenmodelle und sollen die Fähigkeit des Verfahrens demonstrieren, der Geometrie automatisiert Darstellungsstile zuweisen zu können.

Unterscheidung einzelner Objektgruppen nicht möglich



Verschiedene Farbwerte machen Gebäudebestandteile ersichtlich



Unterscheidung einzelner Flächen dank Schattierung möglich

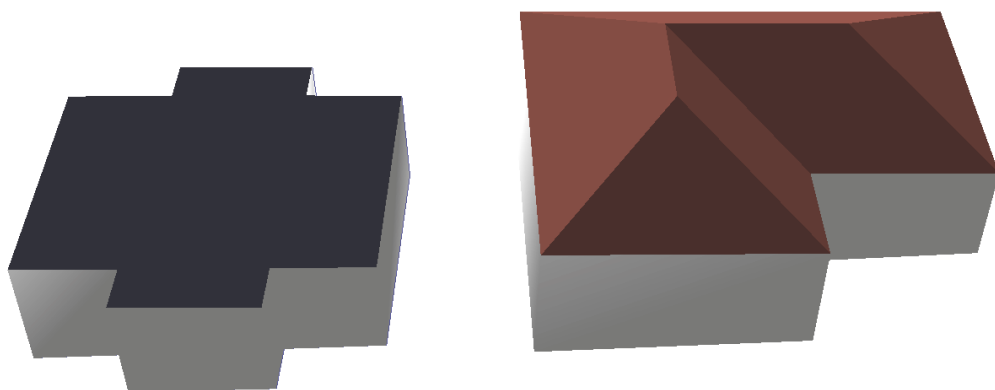


Abb. 83: Einsatz von Farbwert und Helligkeit zur Unterscheidung individueller Strukturen

Die Definition der Grundfarbe der Dachkonstruktion geschieht auf Vertexbasis, es könnte also jeder einzelnen Dachfläche ein Farbverlauf zugeteilt werden, verwendet wird jedoch ausschließlich ein Farbwert pro Dach. Durch unterschiedliche Farbgebungen können Dach und Gebäudetorso unterschieden sowie benachbarte Dächer variiert werden. Damit einzelne Dachflächen ersichtlich werden und nicht im Einheitsfarbton „untergehen“, muss eine weitere Eigenschaft, wie z.B. die Helligkeit, verändert werden, als erwünschter Nebeneffekt kann damit Schattenwurf ausgedrückt werden (vgl. Abb. 83: S. 95). Der Helligkeitswert wird in erster Linie durch die Orientierung der Dachfläche bestimmt, d.h. weist die Lichtquelle in Richtung Polygonvorderseite, dann verhält sich der Betrag des Kosinuswertes des Winkels zwischen Polygonnormale a und Lichtvektor b proportional zur Helligkeit der Polygonfarbe [APE-08]:

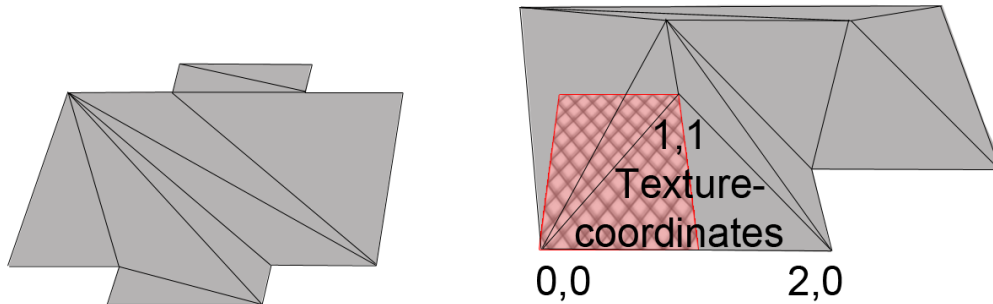
$$\cos(\alpha) = (a_x * b_x + a_y * b_y + a_z * b_z) / (a_{Length} + b_{Length}) \quad (4)$$

$$color_{flat_shaded} = -\cos(\alpha) * color_{brightest} \quad (5)$$

Vereinfachte Formel, geht von einer einkanaligen Farbpalette aus, die von Dunkel nach Hell verläuft.

Die dazu erforderlichen Polygonnormalen existieren im Modell nicht per se, sondern müssen erst pro Vertex ermittelt werden. Die Bestimmung erfolgt durch Berechnung des Kreuzproduktes jeweils zweier dachflächenbegrenzender Kanten, ein grundrisstyp-spezifischer Katalog gibt dabei an welche Kanten heranzuziehen sind. Ähnliche Angaben sind auch für die Verwendung von Texturen notwendig, damit die Art und Weise der Abbildung auf die Polygonfläche festgelegt werden kann. Texturkoordinaten definieren dabei im 2D-Raum der zu dekorierenden Fläche die Zuordnung zwischen Geometriepixel und Texturelement, wobei die Texturdimension auf das Intervall $[0, 1]$ umgelegt ist. Werte außerhalb dieses Bereiches lassen sich zur Erzielung des Effektes einer Texturkachelung nutzen (vgl. Abb. 84: S. 97). Die Bestimmung der Texturkoordinaten erfolgt bei horizontalen Dachkonstruktion wie dem Flachdach durch einfache Übernahme der X-, Y-Koordinaten der Vertices sowie einer Anpassung an die spezifische Auflösung des Texturbildes mittels eines Faktors. Bei geneigten Dächern, speziell dem Walmdach, muss hingegen für Hoch- und Rechtswert der Texturkoordinaten die genaue Distanz zwischen First und Traufe sowie der Versatz von Kehle und Grat berechnet werden.

Angabe der Texturkoordinaten für jeden Vertex einer Dachfläche.



Visualisierung eines Dachflächenmodelles mittels der graphischen Variablen Farbe, Helligkeit und Muster.

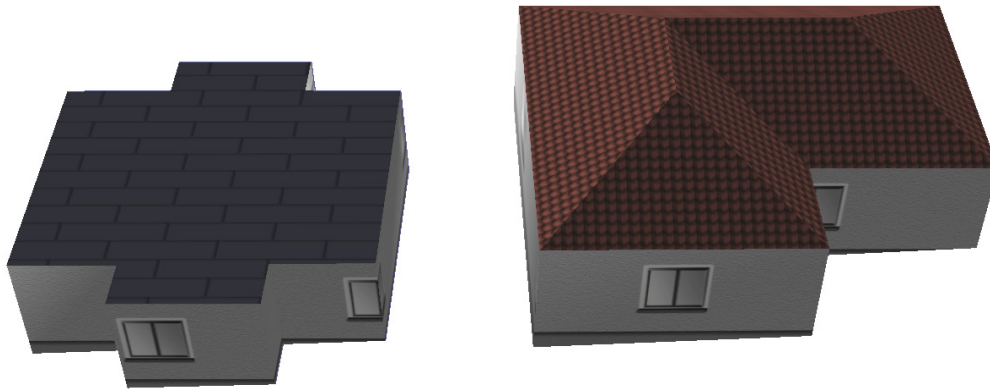


Abb. 84: Verwendung von Texturen zur Ergänzung von Farbwert und Helligkeit

Bei den im Verfahren verwendeten Texturen handelt es sich um Grauwertbilder mit Mustern typischer Dachdeckungen, die Bilder werden später so in die 3D-Bibliothek eingebunden, dass dabei reinweiße Flächen im Bild die Grundfarbe der unterliegenden Geometrie annehmen. Dadurch kann bereits mit einer geringen Musteranzahl ein weites Maß an Darstellungsstilen erzeugt werden und durch einfaches Hinzufügen weiterer Grundfarben können neue Stile erstellt werden (vgl. Abb. 85: S. 98).

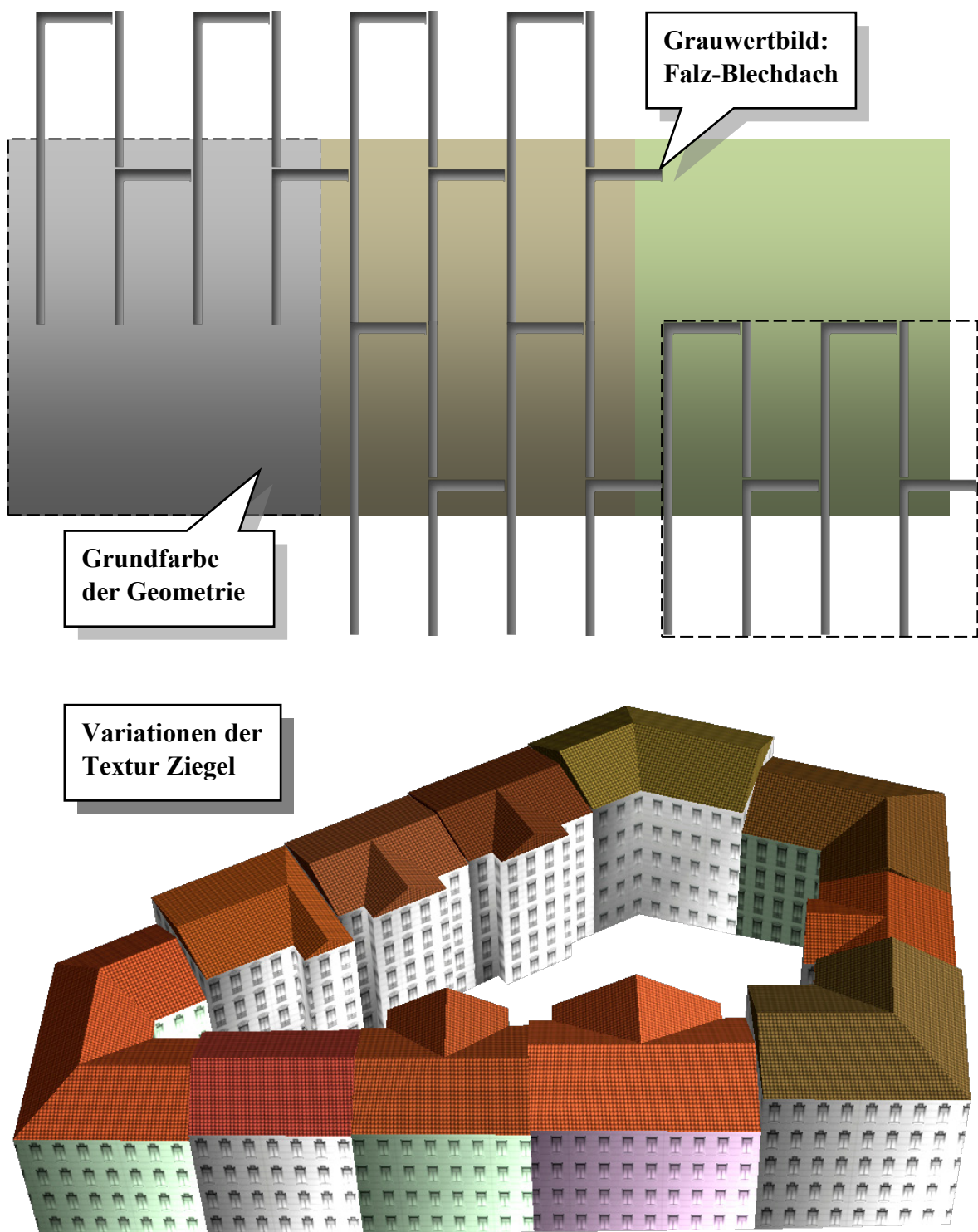


Abb. 85: Flexibilität durch Einsatz diskret aufgebauter Darstellungsstile aus Grundfarbe und Grauwertbild

4.6 Evaluierung des Dachflächenmodelles

Das Ziel dieses Verfahrensschrittes ist die Visualisierung des Dachflächenmodelles zusammen mit weiteren Objektgruppen eines 3D-Stadtmodelles um in einer anschließenden Gegenüberstellung mit Abbildungen der Realität die virtuellen Dachlandschaften einer Evaluierung unterziehen zu können.

Eingabe: Darstellungsbezogenes Modell

- Visualisierungsdaten Dachflächenmodell mit Darstellungsstilen: 3D-Szenengraph-Format, Geometrietyp: Polygon
- Visualisierungsdaten Gebäudetorsi mit Darstellungsstilen: 3D-Szenengraph-Format, Geometrietyp: Polygon
- Visualisierungsdaten Geländemodell mit Darstellungsstilen: 3D-Szenengraph-Format, Geometrietyp: Polygon
- Visualisierungsdaten Vegetation mit Darstellungsstilen: 3D-Szenengraph-Format, Geometrietyp: Polygon

Eingabe: Vergleichsdaten

- Schrägluftbilder: RGB-Raster, variable Auflösung

Ausgabe: Evaluierungsergebnis

Durch die Einbindung einer 3D-Bibliothek in die Beispielapplikation kann eine Echtzeitdarstellung der Visualisierungsdaten erfolgen, damit ist die technische Grundlage gelegt um eine Beantwortung der Forschungsfrage in Form eines visuellen Vergleiches mit Schrägluftbildern durchzuführen.

4.6.1 Übersicht der Evaluierung

Das Dachflächenmodell dient als Informationsträger einer virtuellen Abbildung der Dachlandschaft und tritt in Form von Visualisierungsdaten auf. Die daraus resultierende graphische Umsetzung, dargestellt mit Hilfe der 3D-Bibliothek, gilt es nun auf Abweichungen zu den Vergleichsdaten zu untersuchen. Die Vergleichsdaten stellen in Form von Schrägluftbildern Informationsträger der uns wahrnehmbaren Realität dar und definieren den anzustrebenden Informationsgehalt des Modelles. Das Dachflächenmodell dieses Verfahrens wurde mit dem Anspruch erstellt unter Einsatz einfacher Mittel eine adäquate Abbildung der Dachlandschaft zu liefern (vgl. Kap. 4.2.2: S. 70), bei der Evaluierung werden Unterschiede im Hinblick auf die Umsetzung dieser Zielsetzung beurteilt. Werden Grenzen der (adäquaten) Abbildbarkeit der Realität, innerhalb des Modelles entdeckt, wird versucht die dafür ausschlaggebenden Gebäude- oder Dachflächenmerkmale zu eruieren. Für jede dieser verfahrenstypischen Beschränkung wird

eine Restriktionsklasse erstellt und eine Aussage darüber abgeliefert, inwieweit sich diese Restriktion auf den Gesamteindruck des modellierten Gebäudes bzw. Daches auswirkt.

Die Gegenüberstellung wird für neun ausgewählte Untersuchungsobjekte (UO) durchgeführt, die sich auf die einzelnen UGs aufteilen (vgl. Abb. 86: S. 101), die Auswahl der UO (vgl. Abb. 87: S. 102) erfolgte mit der Intention ein möglichst breites Spektrum unterschiedlicher Gebäudetypen abzudecken. Die virtuelle Darstellung erfolgt nicht nur für die Ebene der Dachflächen alleine, sondern in Form eines (texturierten) 3D-Stadtmodelles mit den folgenden Objektgruppen:

- Gebäude (Dachflächen, Gebäudetorsi)
- Vegetation
- Gelände

Die Einbindung der, bezogen auf die Thematik dieser Arbeit, wichtigsten drei Ebenen soll dem Benutzer den Vergleich von virtueller und realer Abbildung erleichtern. Die dabei eingesetzten Schrägluftbilder stammen vom Kartendienst Virtual Earth, über den diese hochauflösenden Aufnahmen für alle UO in vier unterschiedlichen azimuthalen Ausrichtungen bezogen werden konnten. Die jeweils repräsentativste Ansicht eines Objektes wurde anschließend in den Satz der Vergleichsdaten realer Abbildungen aufgenommen. Entsprechend den dabei vorliegenden Kameraeinstellungen und -perspektiven wurde unter Einsatz der Echtzeitdarstellung eine möglichst vergleichbare Aufnahme der virtuellen Abbildung des UO angefertigt und ihrerseits in den Satz der Vergleichsdaten virtueller Abbildungen eingereiht.

Die gegenübergestellten Abbildungen werden nun hinsichtlich der Grenzen der (adäquaten) Abbildbarkeit der Realität evaluiert, werden eine oder mehrere Restriktionen entdeckt, wird jeweils ein Ort des Auftretens einer jeden Klasse innerhalb des Luftbildes markiert. Handelt es sich um eine neu entlarvte Restriktionsklasse, wird eine Figur mit durchgezogenem Rand zur Verortung verwendet, bei Auftreten einer bereits bekannten Restriktion wird ein strichlierter Rand eingesetzt.

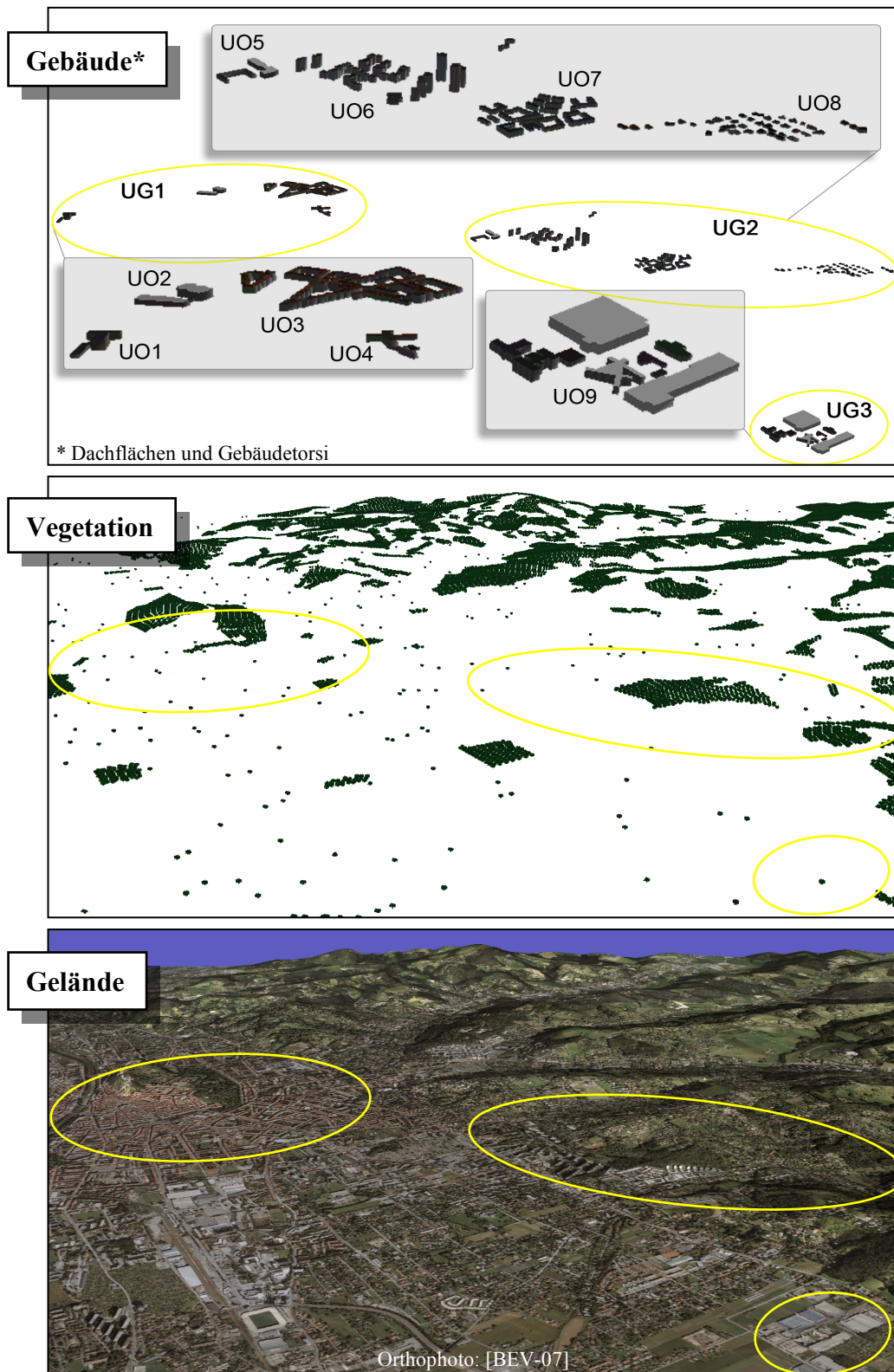
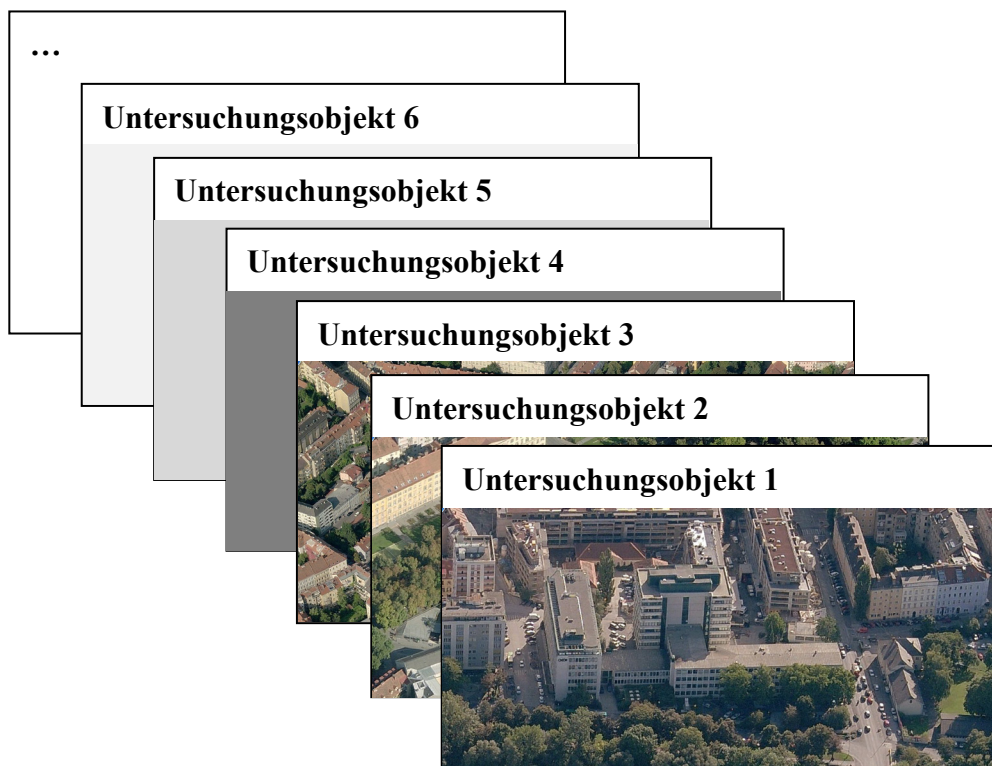


Abb. 86: Virtuelle Abbildung der zu evaluierenden Untersuchungsobjekte, integriert als Teil eines 3D-Stadtmodelles

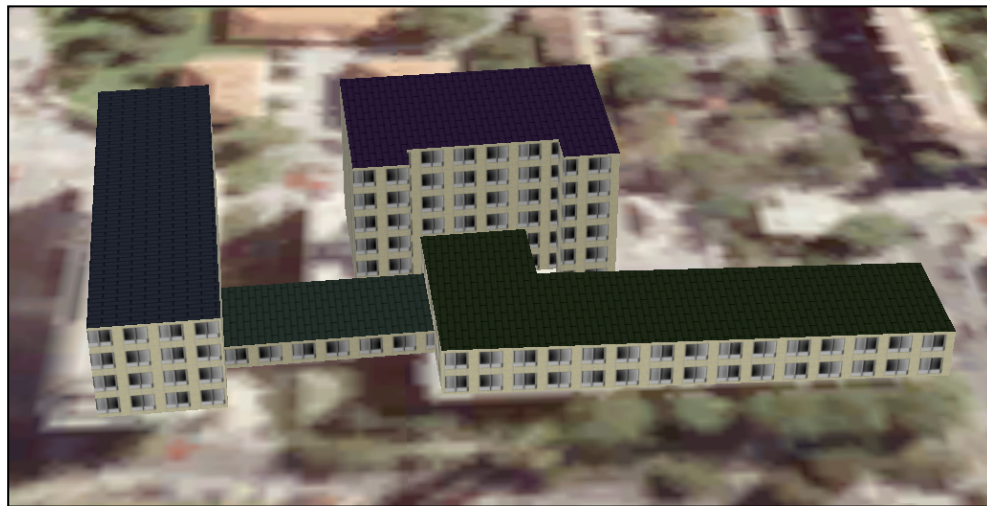


Luftbild: [VRE-09]

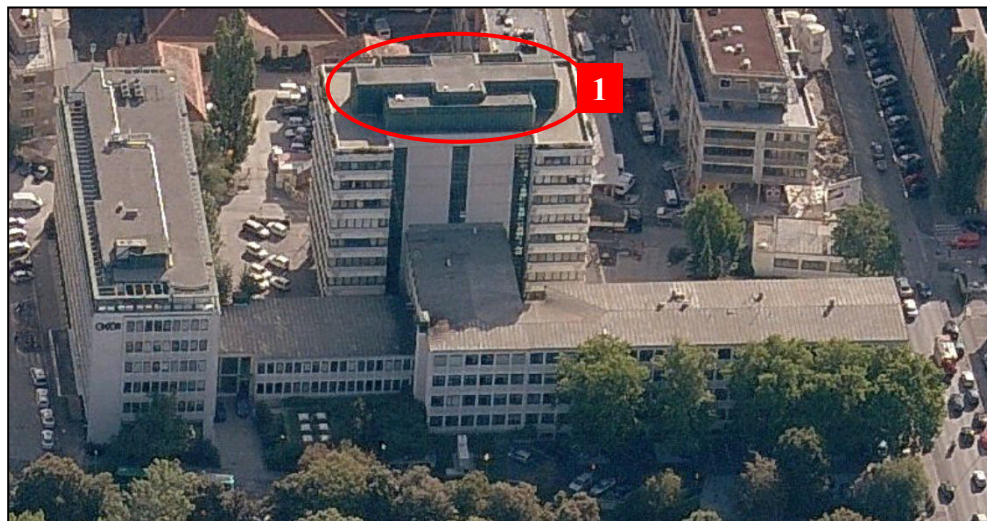
Abb. 87: Reale Abbildungen der zu evaluierenden Untersuchungsobjekte in Form von Schrägluftbildern

4.6.2 Untersuchungsgebiet 1

Bei Untersuchungsobjekt 1 handelt es sich um ein typisch zweckmäßiges Bürohochhaus in lockerer Bauform mit unterschiedlichen Dachflächenniveaus, die Modellierung erfolgte mittels vordefinierter Grundrisstypen und zugeteiltem Flachdach, aufgrund der einfachen Dachform (keine Dachflächenverschneidungen) wäre auch ein prismatischer Ansatz für komplizierte Grundrisse möglich gewesen. Die Gegenüberstellung (vgl. Abb. 88: S. 103) bestätigt die Annahme der Anforderungsanalyse, dass eine adäquate Abbildung der Dachflächen dieses Gebäudetypus unter Einsatz einfacher Mittel möglich ist. Als Grenze erweisen sich Dachaufbauten (Restriktion 1), deren Abwesenheit aber wenig Einfluss auf das Gesamtbild nimmt.



Orthophoto: [BEV-07]



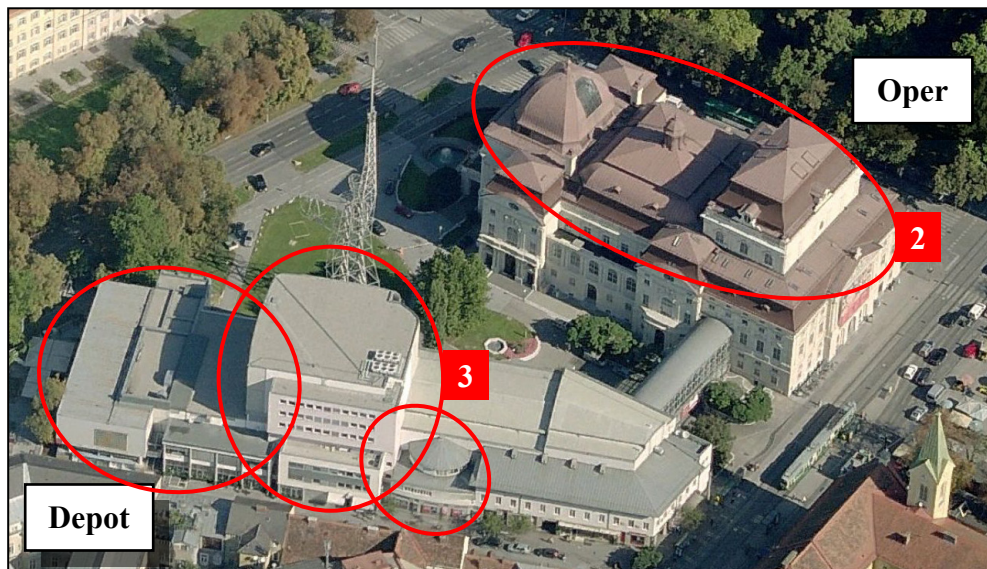
Luftbild: [VRE-09]

Abb. 88: Vergleich der Abbildungen von Untersuchungsobjekt 1

Bei Untersuchungsobjekt 2, der Grazer Oper und dem angrenzenden Kulissendepot, handelt es sich um Gebäudetypen in gedrängter bzw. verschachtelter Bauform. Der Vergleich der Abbildungen (vgl. Abb. 89: S. 104) bestätigt die Annahme des Anforderungsprofiles, dass Gebäude mit ausgeprägten Dachkonstruktionen (Restriktion 2) oder unselbstständigen Gebäudetrakten (Restriktion 3) zur adäquaten Abbildung elaborierter Modellierungsverfahren bedürfen. Dachflächen von Gebäuden mit diesen beiden Merkmalen stellen somit Grenzen einfacher Lösungsansätze dar, die Absenz der Dachkonstruktion hat starke Auswirkungen auf den Gesamteindruck der Gebäude und lässt sie als Fremdkörper erscheinen.



Orthophoto: [BEV-07]



Luftbild: [VRE-09]

Abb. 89: Vergleich der Abbildungen von Untersuchungsobjekt 2

Untersuchungsobjekt 3 stellt einige Baublöcke im gründerzeitlichen Stil dar, angesichts dafür typischer Eigenschaften wie der Dachform Satteldach oder einer beschränkten Anzahl an grundrissabhängigen Typen von Dachflächenverschneidungen galt die Annahme, dass ein Satz an vordefinierten Prototypen eine adäquate Abbildung der Dachlandschaft ermöglichen sollte. Unter Vernachlässigung der Dachdetails bestätigt die Gegenüberstellung grundsätzlich diese Hypothese, vereinzelt zeigen sich jedoch Grenzen der Abbildbarkeit in Form bereits bekannter (Erkerdächer), aber auch neuer Beschränkungen wie fehlende, aber ergänzungswertige Grundriss- bzw. Dachformprototypen (Restriktion 4) oder gemischte Dachabschlüsse von Giebel und Walm

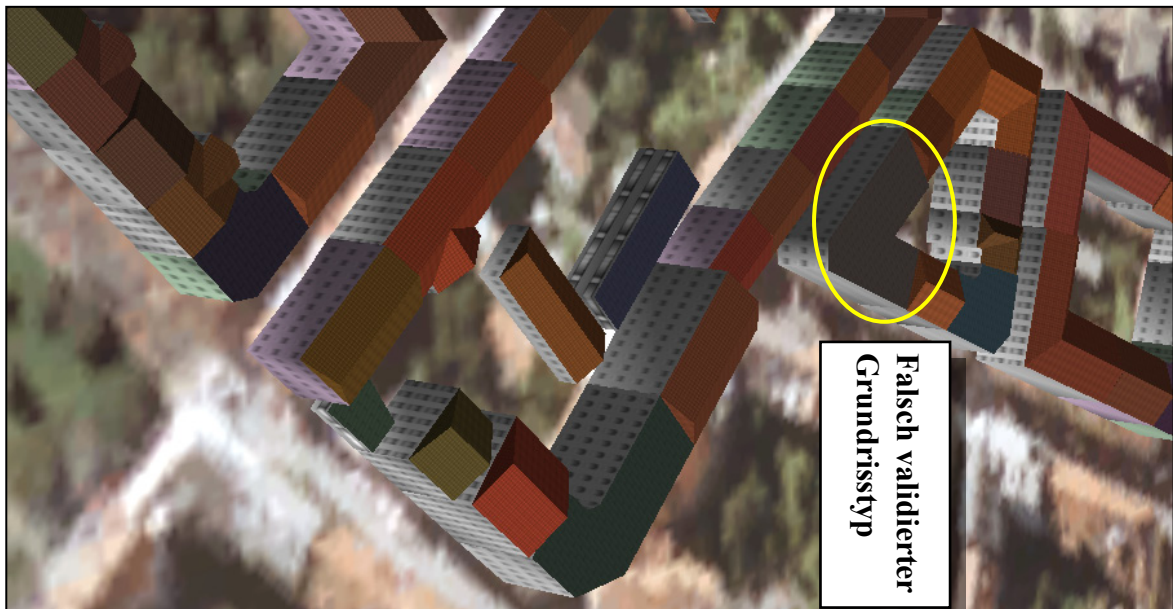
(Restriktion 5). I.A. wirken sich diese Beschränkungen nur mittel auf das Gesamtbild der Gebäude aus, da sie nur punktuell in Erscheinung treten, allerdings kann dadurch ein monotoner Eindruck entstehen.



Orthophoto: [BEV-07]



Luftbild: [VRE-09]



Orthophoto: [BEV-07]

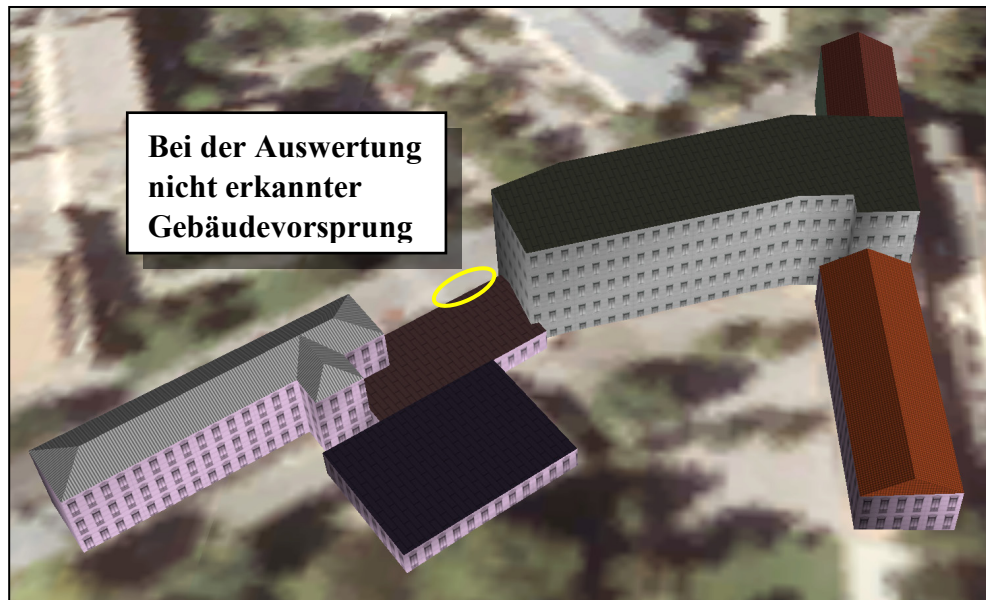


Luftbild: [VRE-09]

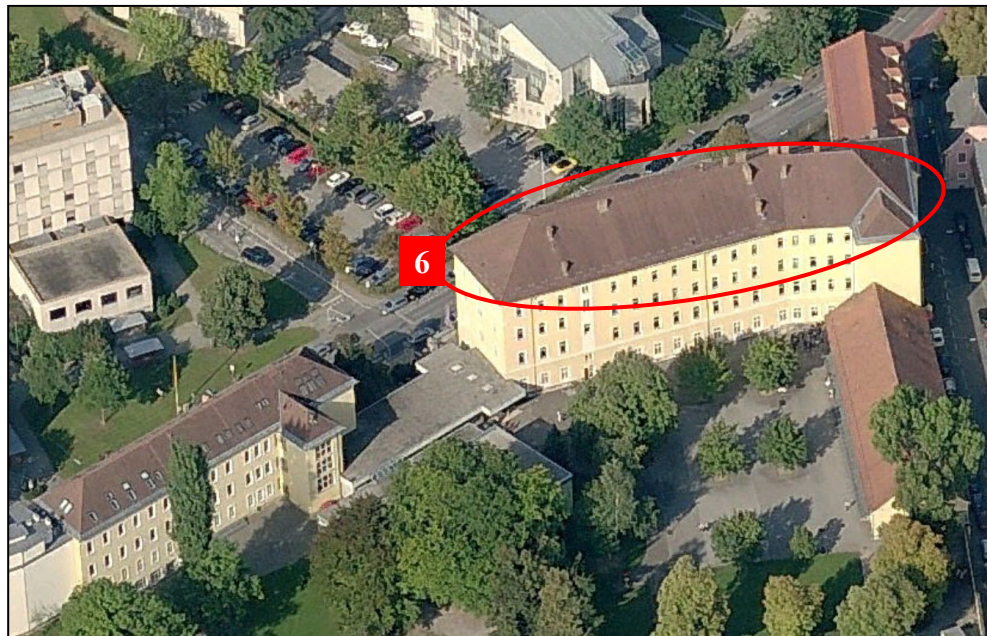
Abb. 90: Vergleich der Abbildungen von Untersuchungsobjekt 3

Bei Untersuchungsobjekt 4 handelt es sich um einen Gebäudekomplex mit Gebädetrakten unterschiedlicher Traufenhöhe. Es galt die Annahme, dass infolge der gegebenen Eigenständigkeit sowie der Absenz gebäudeübergreifender Dachverschneidungen prinzipiell auch ohne höherrangige Modelltypen ein vernünftiges Resultat erzielt werden könnte. Wie der Vergleich (vgl. Abb. 91: S. 107) zeigt, lassen sich aber nicht die Dachflächen aller Gebäude in adäquater Weise erfassen, da der Grundriss des Hauptgebäudes keinem der vordefinierten Typen entspricht. Als Grenze erweist sich in diesem Beispiel also die ungewöhnliche Form eines Grundrisses (Restriktion 6), die eine Aufnahme in den Katalog schlichtweg ausschließt. Die verfahrensbedingt resultierende,

fehlende Dachkonstruktion solcher Grundrisstypen wirkt sich generell stark auf das Gesamtbild eines Gebäudes aus, speziell in diesem Fall, wo es sich um das markanteste Gebäude im Komplex handelt.



Orthophoto: [BEV-07]

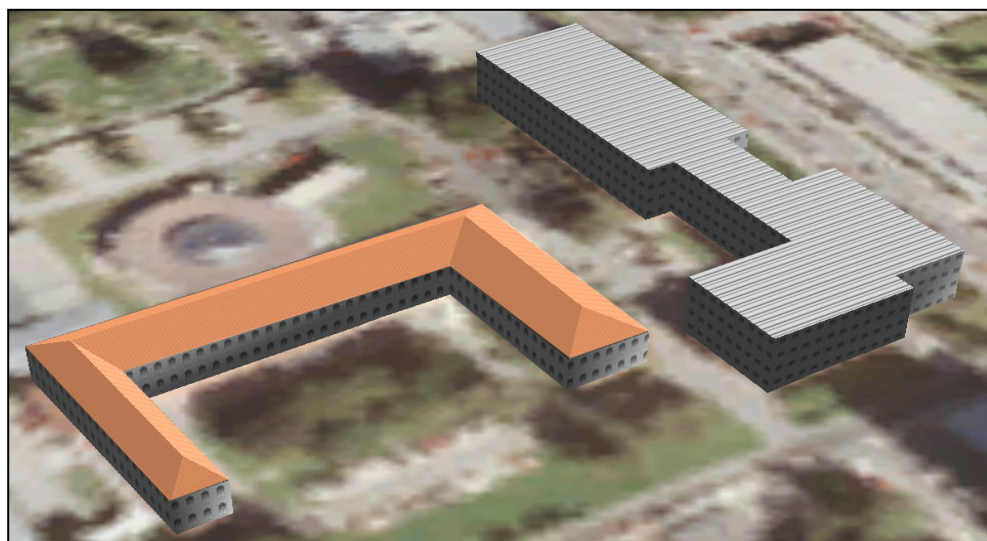


Luftbild: [VRE-09]

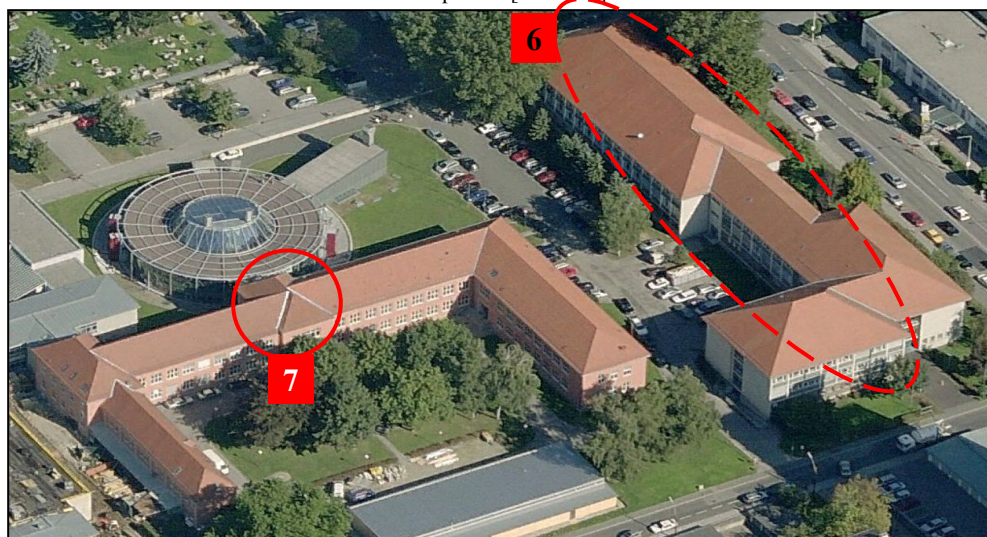
Abb. 91: Vergleich der Abbildungen von Untersuchungsobjekt 4

4.6.3 Untersuchungsgebiet 2

Untersuchungsobjekt 5 demonstriert die bewusste durchgeführte Manipulation einer Grundrissabbildung um im Gegensatz zum vorherigen Beispiel in den Genuss eines geneigten Daches zu gelangen. Die Gegenüberstellung (vgl. Abb. 92: S. 108) zeigt, dass trotz der prinzipiell ungenügenden Aufnahme von Grundriss und Dachform eine adäquate Abbildung auf Basis einfacher, vordefinierter Dachflächenmodelle stattfinden kann. Die aus der Anpassung resultierenden Abweichungen (Restriktion 7) stellen die Grenzen dieses beschränkten Ansatzes dar, der wie bereits erwähnt nur punktuell bei dafür geeigneten Grundrisstypen zum Einsatz kommen sollte. Die Auswirkungen auf den Gesamteindruck des Gebäudes entsprechend denen von Untersuchungsobjekt 3.



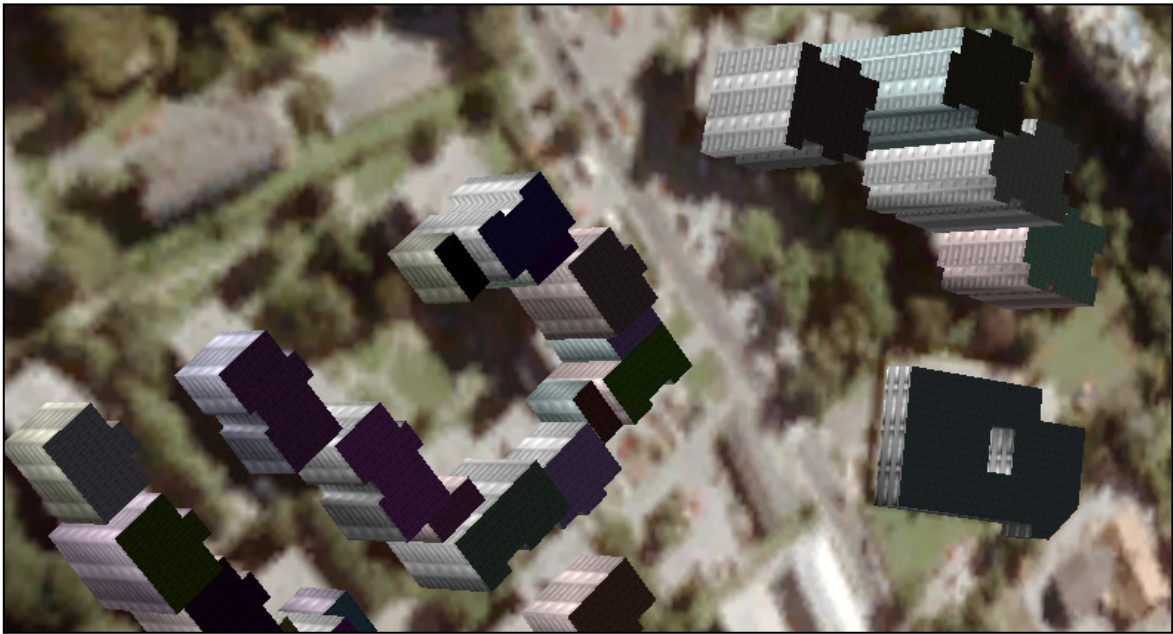
Orthophoto: [BEV-07]



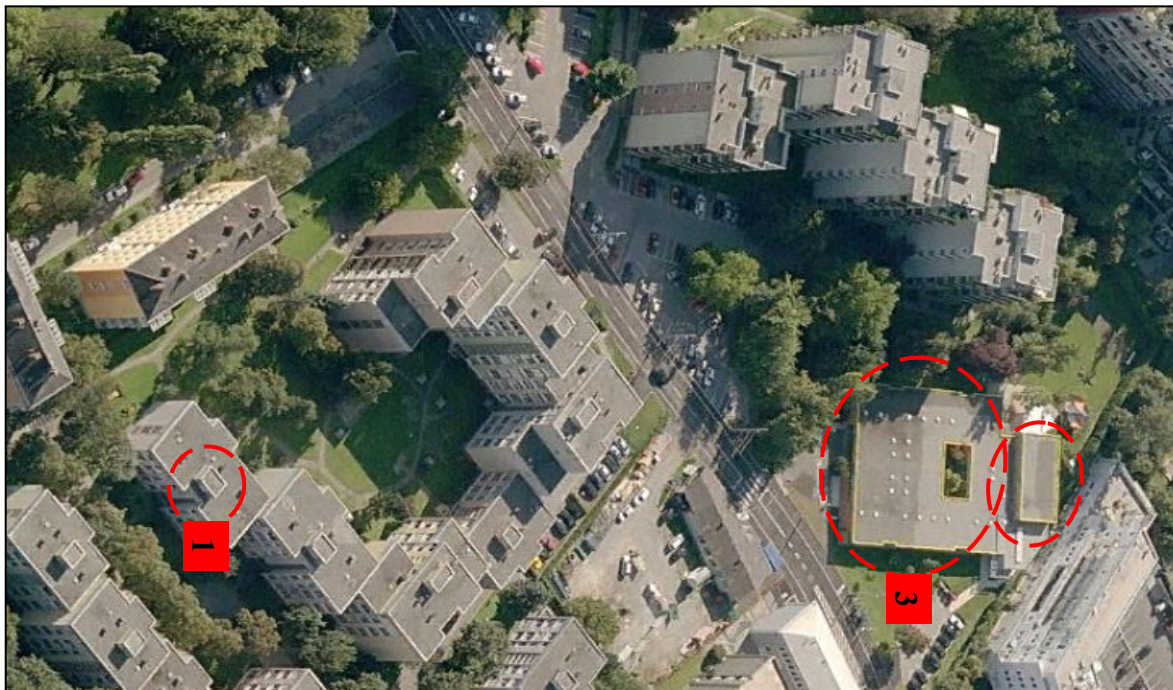
Luftbild: [VRE-09]

Abb. 92: Vergleich der Abbildungen von Untersuchungsobjekt 5

Untersuchungsobjekt 6 zeigt mehrere, dem Untersuchungsobjekt 1 bzw. 3 ähnliche Gebäudetypen, die aufgrund ihrer ungewöhnlichen Grundrissform nach einem prismatischen Modelltyp verlangen. Im Vergleich (vgl. Abb. 93: S. 109) zeigen sich keine neuen Erkenntnisse, sondern nur bereits bekannte Restriktionen und Auswirkungen auf das Gesamtbild.



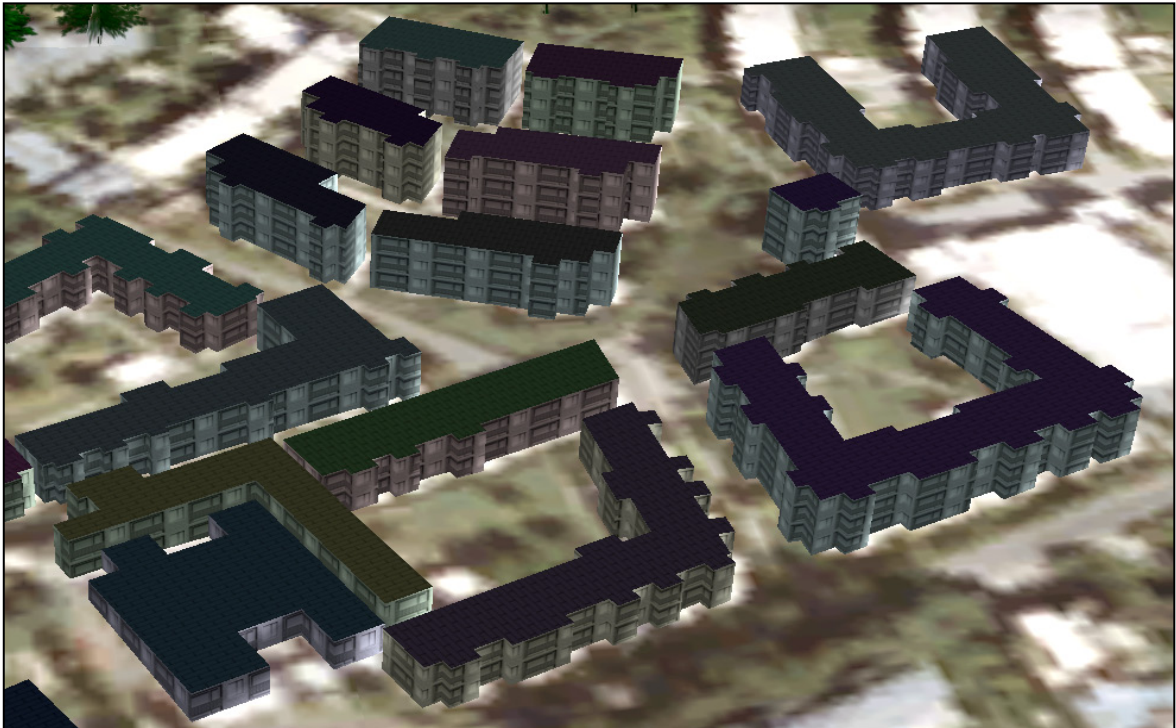
Orthophoto: [BEV-07]



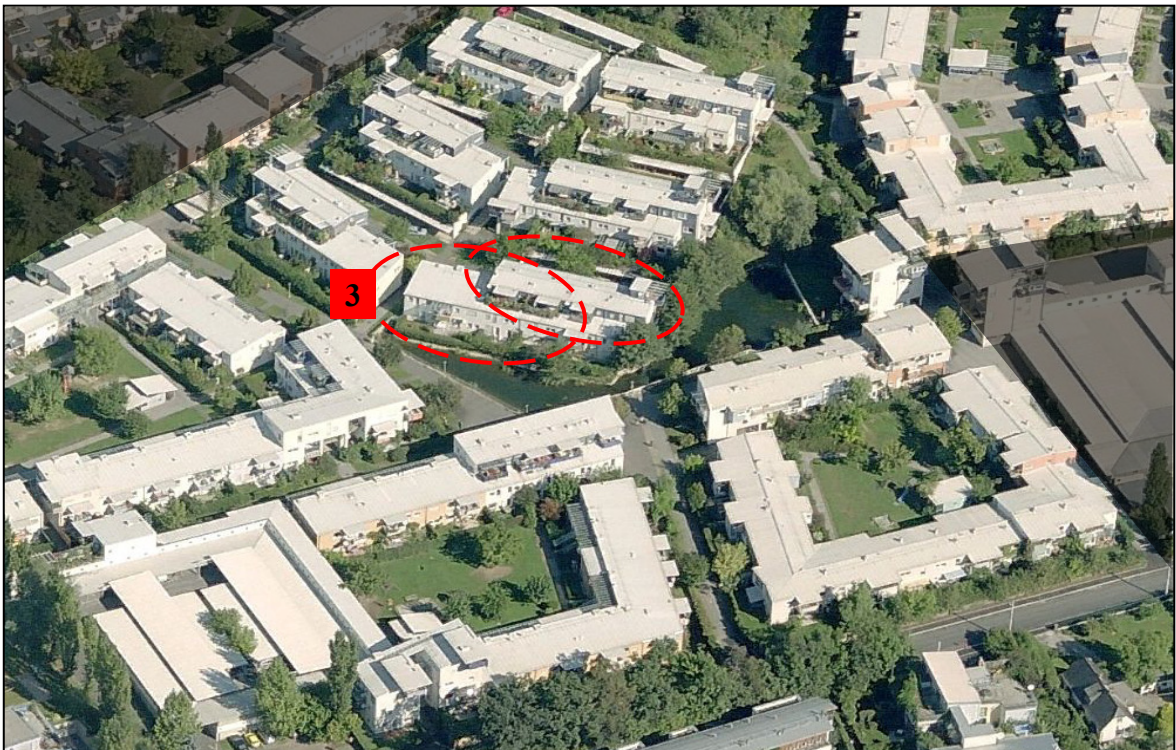
Luftbild: [VRE-09]

Abb. 93: Vergleich der Abbildungen von Untersuchungsobjekt 6

Auch durch Untersuchungsobjekt 7 können keine neuen Erfahrungen gewonnen werden.



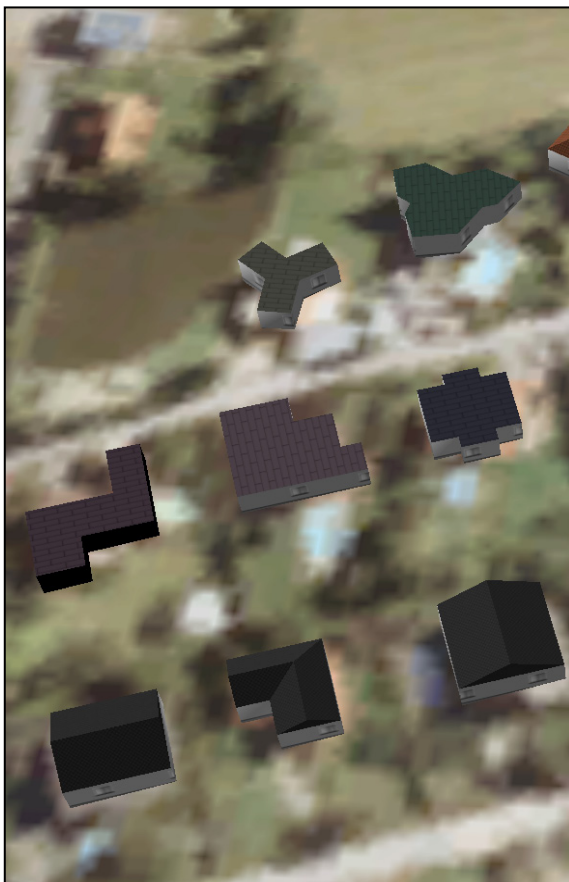
Orthophoto: [BEV-07]



Luftbild: [VRE-09]

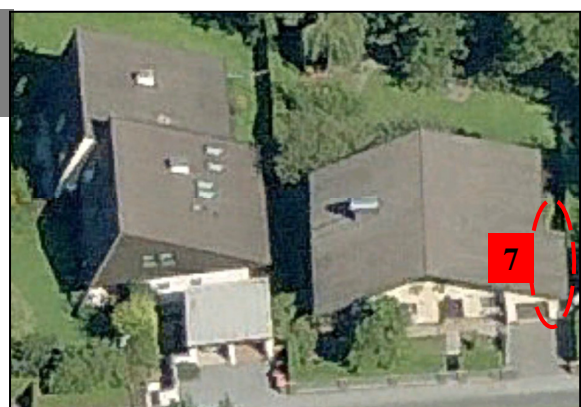
Abb. 94: Vergleich der Abbildungen von Untersuchungsobjekt 7

Bei Untersuchungsobjekt 8 handelt es sich um mehrere Einfamilienhäuser, bei denen sich wie angenommen das größte Spektrum an Restriktionen zeigt, der Vergleich (vgl. Abb. 95: S. 112) fördert ein sehr inhomogenes Bild zu Tage, sodass die Frage einer adäquaten Abbildung nur differenziert pro Gebäude beantwortet werden kann. Zu den bereits bekannten Beschränkungen gesellen sich zwei neue Kriterien, die aufgrund der Dimensionen der bisherigen Untersuchungsobjekte vernachlässigt werden konnten, nun aber bereits wenig bis mittlerer Auswirkungen auf das Gesamtbild eines Gebäudes nehmen. Bei diesen größenspezifischen Grenzen der Abbildbarkeit handelt es sich um Dachüberhänge (Restriktion 8) und größere Gauben (Restriktion 9).

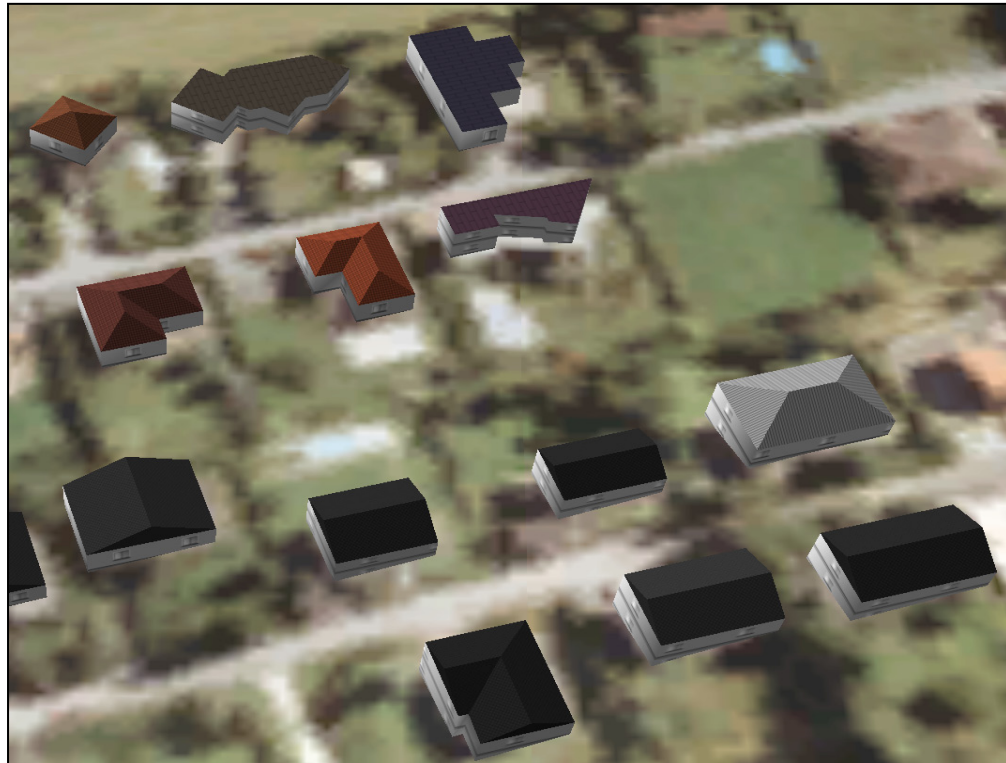


**Noch nicht adressiertes
Darstellungsproblem**

Orthophoto: [BEV-07]



Luftbild: [VRE-09]



Orthophoto: [BEV-07]



Luftbild: [VRE-09]

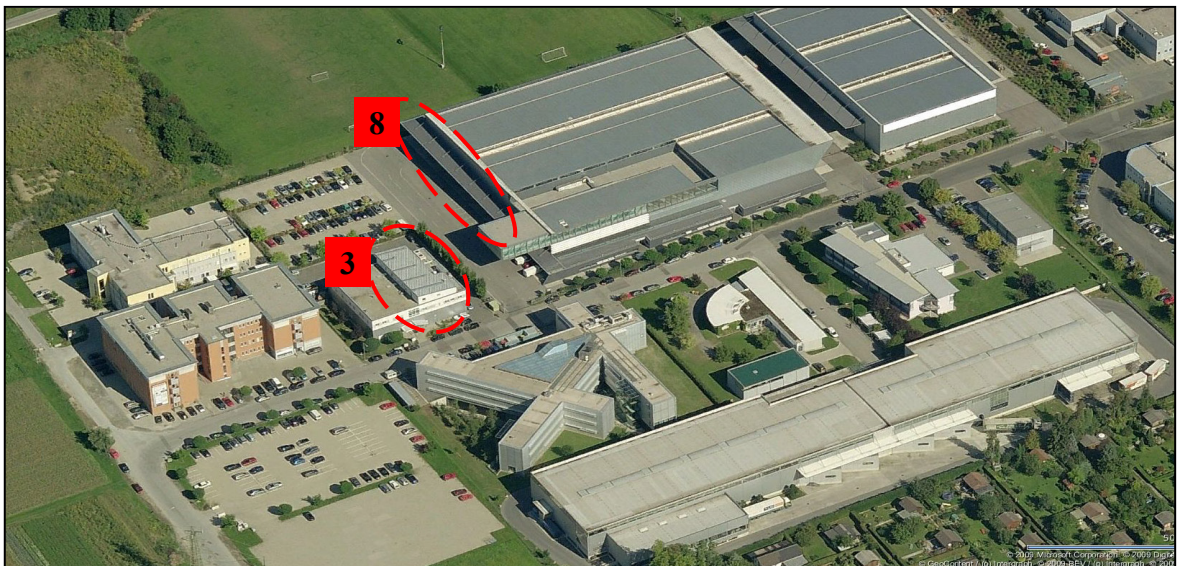
Abb. 95: Vergleich der Abbildungen von Untersuchungsobjekt 8

4.6.4 Untersuchungsgebiet 3

Untersuchungsobjekt 9 stellt eine Ansammlung unterschiedlicher Gewerbebauten dar. Aufgrund der einfachen Dachformen können die durchaus komplizierten Grundrisse mittels prismatischer Modelle befriedigt werden sodass, eine einheitliche, adäquate Abbildung erreicht werden kann, wie die Gegenüberstellung beweist (vgl. Abb. 96: S.113). Nur vereinzelt zeigen sich gewisse Grenzen des einfachen Verfahrensansatzes, deren Auswirkungen auf das Gesamtbild aber wenig Einfluss nehmen.



Orthophoto: [BEV-07]



Luftbild: [VRE-09]

Abb. 96: Vergleich der Abbildungen von Untersuchungsobjekt 9

4.6.5 Ergebnisse der Evaluierung

Folgende Übersicht (vgl. Tab. 7: S. 114) soll die in der Evaluierung bestätigten bzw. neu ausgemachten Restriktionen zusammengefasst auflisten:

Restriktions- klasse	Beschreibung der Beschränkung	Auswirkung der Beschränkung auf das Gesamtbild der Abbildung
1	Dachaufbauten. Klima- und Aufzugsanlagen, meist anzutreffen auf Flachdachbauten größeren Ausmaßes	wenig
2	Ausgeprägte Dachkonstruktionen. Dachformen repräsentativer Gebäude die bewusst aufwändig gehalten wurden.	stark
3	Dachflächen gedrängter, verschachtelter oder unselbstständiger Gebäudeteile/-trakte	stark
4	Fehlende, aber ergänzungswertige Prototypen	mittel* bis stark
5	Gemischte Dachabschlüsse der Gebäudestirnseiten Walm- und Giebelkonstruktionen innerhalb des selben Daches	wenig
6	Dachflächen mit komplexen Grundrissen, denen eine Umsetzung als Grundrisstyp verwehrt bleibt Auch prinzipiell einfache Dachformtypen führen aufgrund verworrener Grundrisse zu komplizierten Dachflächenverschnitten	stark
7	Dachflächen(teile) die aufgrund bewusst manipulierter Auswertungen verloren gehen	wenig bis mittel
8	Dachüberhänge bei Gebäuden kleineren Ausmaßes	wenig bis mittel
9	Gauben bei Gebäuden kleineren Ausmaßes	wenig bis mittel

* wenn ein formverwandter Prototyp definiert ist

Tab. 7: Beschränkungen und Auswirkungen einfacher Lösungsansätze zur Dachflächenmodellierung

5 Zusammenfassung

Bevor eine Auseinandersetzung mit der Forschungsfrage dieser Arbeit stattfinden konnte, mussten erst bestimmte Vorkenntnisse vermittelt werden. So war es unerlässlich, die im Blickpunkt stehenden Dachflächenmodelle thematisch mit dem Begriff der 3D-Stadtmodelle in Beziehung zu bringen. Dies ermöglichte die Einführung des Detaillierungsgrades, einem gemeingültigen Qualitätskriterium für 3D-Stadtmodelle, der in späterer Folge dazu dienen sollte, die forschungsrelevante Begriffsbildung einer „adäquaten Abbildung von Dachlandschaften“ zu definieren. Nachdem eine Aufzählung und Beschreibung flächendeckend verfügbarer, stadtmodellrelevanter Datengrundlagen erfolgte war, konnten im nächsten Schritt vollends auf dachflächenspezifische Fragen der Modellerstellung übergegangen werden. Der Erstellungsvorgang wurde dabei in die grundlegenden Prozesse der Auswertung und Modellierung aufgegliedert. Verschiedene Methoden zur dachspezifischen Auswertung der Datengrundlagen wurden angeführt und deren Vor- bzw. Nachteile hinsichtlich Detailvermögen oder Arbeitsaufwand beleuchtet. Auch die verfügbaren Modelltypen, wurden anhand ihrer Fähigkeit zur Abbildung unterschiedlicher Dachkonstellationen beschrieben. Erst danach waren die Kenntnisse gegeben, konkret auf Verfahren zur Erstellung von Dachflächenmodellen selbst einzugehen. Die dabei zum Einsatz kommenden unterschiedlichen Verfahrensansätze sollten die Abhängigkeit zwischen Detaillierungsgrad des Modelles und Aufwand des Verfahrens zeigen, und in dieser Hinsicht bereits auf die Forschungsfrage einstimmen.

Das theoretische Wissen zur Erstellung von Dachflächenmodellen sollte nun die Basis zur Auseinandersetzung mit Punkt a. der Forschungsfrage bilden. Trotz des im unteren Bereiches angesiedelten Detaillierungsgrades, zeichnete sich, aufgrund der (bewusst gewählten,) inhomogenen Gebäudestrukturen der Untersuchungsgebiete, ein großes Anforderungsspektrum an den zukünftigen Modelltyp ab. Die differenzierte Betrachtung der Gebäudetypen konnte nichtsdestotrotz einige Vertreter ausfindig machen für deren Abbildung bereits einfache, niederrangige Modelltypen ausreichen könnten. Die resultierenden Anforderungen, ließen sich mit Ausnahme der höherrangigeren Modelltypen implementieren. Das Punkt b. der Forschungsfrage mit den zur Verfügung stehenden Ressourcen überhaupt umgesetzt werden konnte, war der hybriden Herangehensweise zu verdanken. Durch die Existenz entsprechender Schnittstellen der Modellmigration konnten somit komplexe Aufgaben:

- zur automatisierten Verarbeitung an bestehende Werkzeuge delegiert werden oder
- durch die Bereitstellung einer adäquater Arbeitsumgebung auf manueller Basis gelöst werden.

Unmittelbar aus der (mangelnden) Qualität der Implementierung resultierend, mussten jedoch bei der manuell durchzuführenden Auswertung Abstriche in der Bedienbarkeit hingenommen werden. Es war zwar kein Expertenwissen oder gar heikle Modellierungsprozesse für die Dachflächenerstellung erforderlich, jedoch mussten einige

verfahrensspezifische Besonderheiten bei Digitalisierung und Attributierung berücksichtigt werden, welche sich negativ auf den Arbeitsfluss auswirkten. Im abschließenden Evaluierungsprozess (Punkt c. der Forschungsfrage) konnten das, auf theoretischen Annahmen, basierende Anforderungsprofil der Implementierung in der Praxis bestätigt werden. Es zeigten sich auch neue, bisher umadressierte Beschränkungen, die jedoch wenig Einfluss auf das Gesamtbild nehmen. Als wesentlichste Restriktionen sollen folgenden Gebäude-/Dachmerkmale angeführt werden:

- Dachkonstruktionen unselbstständiger Gebäudeteile
- Dachkonstruktionen komplexer Grundrissformen
- Ausgeprägte Dachkonstruktionen, jeglicher Grundrissform

Die verschiedenen Arten an Beschränkungen und deren unterschiedliche Auswirkungen lassen daraus schließen, dass eine einheitliche, adäquate Abbildung der Dachlandschaften inhomogener Gebiete unter Anwendung einfacher Lösungsansätze i.A. nicht möglich ist. Nur unter der Bedingung, dass a priori Wissen über:

- Anforderung: Kenntnis der baulichen Strukturen (Gebäudetypen) der abzubildenden Region
- Fähigkeit: Stärken und Schwächen des Verfahrens

vorliegt, kann bei Übereinstimmung beider Kriterien von den Vorzügen einfacher Verfahren der Dachflächenmodellierung profitiert werden.

6 Literatur

- [ALB-03] ALBERT, J., BACHMANN, M., HELLMEIER, A.: *Zielgruppen und Anwendungen für Digitale Stadtmodelle und Digitale Geländemodelle*. Erhebungen im Rahmen der SIG 3D der GDI NRW, http://www.ikg.uni-bonn.de/sig3d/docs/Tabelle_Anwendungen%2BZielgruppen.pdf, 2003
- [AIC-95] AICHHOLZER, Oswin, AURENHAMMER, Franz, ALBERTS, David, GÄRTNER, Bernd: *A novel type of skeleton for polygons*. Journal of Universal Computer Science, 1995, S. 752-761
- [APE-08] APETRI, Marius: *3D-Grafik Programmierung*. Heidelberg, mitp, 2008
- [BAU-96] Land Niederösterreich: *Niederösterreichische Bauordnung 1996*. 1996, §4 Begriffsbestimmungen
- [BAU-09] das-baulexikon.de: *Dachflächen*. <http://www.das-baulexikon.de/lexikon/index.html>, Seitenzugriff: 08.08.2009, 2009
- [BEV-05] Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen: *100 Jahre Amtsgebäude Krotenthallergasse*, Wien, Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, 2005
- [BEV-07] Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen: *Orthophotos, laut Nutzungsbedingungen für die Universität Wien*. 2007
- [BEV-09] Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen: *Bestelldokumentation Katastralmappe und Verzeichnisse*. 2009
- [BRA-06] BRAUMANN Birgit: *Objektorientierte Gebäudedetektion in Laserscannerdaten und multispektralen Bildern*. Wien, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität Wien, 2006
- [BRE-00] BRENNER, Claus: *Towards fully automatic generation of city models*. http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/2000/Brenner_amsterdam.pdf, Seitenzugriff: 13.09.2009, 2000
- [CZA-04] CZAJA, J., DONAUBAUER, A., GEIER, M., HUBER, A., KAENICKE, K., KUNKEL, T., MATHEUS, A., NEUMEIER, S., SCHEUGENPFLUG, S.: *Trendanalyse zur Intergeo 2003*. Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation 01/2004, 2004, S. 66-69
- [DGL-09] DGL Wiki: *Level of Detail*. http://wiki.delphigl.com/index.php/Level_of_Detail, Seitenzugriff: 12.08.2009
- [DIG-09] My Digital Life: *New NAVIGON 7300T Featuring Intelligent MyRoutes And Rand McNally Scenic Routes Content*. <http://www.mydigitalife.info/2009/03/04/new-navigon-7300t-featuring-intelligent-myroutes-and-rand-mcnally-scenic-routes-content/>, Seitenzugriff: 16.08.2009, 2009
- [DOR-08] DORNINGER, Peter, PFEIER, Norbert: *A Comprehensive Automated 3D Approach for Building Extraction, Reconstruction, and Regularization from Airborne Laser Scanning Point Clouds*. Sensors 2008, 8, 7323-7343, 2008

- [FHW-09] Foundation of the Hellenic World: *Priene the Greek Ancient City in Asia Minor*. http://www.openscenegraph.org/projects/osg/attachment/wiki/Screenshots/FHW/Priene_shot5.png, Seitenzugriff: 15.08.2009, 2009
- [FÖR-93] FÖRSTNER, W., PALLASKE, R.: *Mustererkennung und 3D-Geoinformationssysteme*. Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, Heft 5/1993, 1993, S. 167-177
- [FRA-05] FRANZEN, Michael: *Photogrammetrische Datenerfassung 1 – Begleittext zur Vorlesung*. 2005
- [FRA-06] FRANZEN, Michael: *Photogrammetrische Datenerfassung 2 – Begleittext zur Vorlesung*. 2006
- [GDI-08] Geodateninfrastruktur 3D: *Heidelberg 3D*. <http://www.giub.uni-bonn.de/karto/hd3d/screenshots.de.htm>, Seitenzugriff: 12.08.2009, 2008
- [GPX-09] Geoplex: *3D Informationssysteme*. <http://www.geoplex.de/produkte/>, Seitenzugriff: 12.08.2009, 2009
- [GRÖ-04] GRÖGER, G., BRENNER, J., DÖRSCHLAG, D., DREES, R., GRUBER, U., LEINEMANN, K., LÖWNER, M.-O.: *Das interoperable 3D-Stadtmodell der SIG 3D*, ZfV, Heft 06/2005, 2004, S.343-353.
- [HAA-04] HAALA, Norbert: *Laserscanning zur dreidimensionalen Erfassung von Stadtgebieten*. In: Coors, V. (ed.); Zipf, A. (ed.): *3D-Geoinformationssysteme*, Wichmann Verlag, 2004
- [HAA-06] HAASE, Kerstin: *3D-Stadtmodellierung auf Basis von Daten des Automatisierten Liegenschaftskatasters (ALK) am Beispiel der Stadt Wuppertal*. Bochum, Fachhochschule Bochum, 2006
- [HAK-02] HAKE, Günter, GRÜNREICH, Dietmar, MENG, Liqiu: *Kartographie*. Berlin – New York, Walter de Gruyter, 2002
- [HAU-05] HAUENSTEIN, Thomas: *Aufbau des 3D-Stadtmodelles der Stadt Karlsruhe*. 2. ESRI Anwendertreffen Baden-Württemberg, http://www.fht-stuttgart.de/fbv/fbvweb/veranstaltungen/ESRI/Vortraege_2005/Thomas_Hauenstein.pdf, Seitenzugriff: 12.08.2009, 2005
- [IMM-09] Immobilienscout24: *Bauplaner*. <http://www.immobilienscout24.de/de/bauen/bauplaner/hausplanung/bauteile/index.jsp>, Seitenzugriff: 09.08.2009
- [JAN-03] JANSÁ, Josef, STANEK, Heinz: *Ableitung von Stadtmodellen aus Laser-Scanner-Daten, Grundrissplänen und photographischen Aufnahmen*. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI), 2003, S. 262 – 270
- [JAN-07] JANUSCH, Sven: *Konzeption & Realisierung eines prozeduralen Ansatzes zur Erzeugung von Gebäuden*. Fachbereich Informatik, Hochschule Darmstadt, 2007
- [KAA-06] KAARTINEN, Harri, HYYPPÄ, Juha: *EuroSDR-Project Commission 3 "Evaluation of Building Extraction", Final Report*. EuroSDR - European Spatial Data Research Official Publication No 50, 2006, S. 9 – 77

- [KAG-09] KAGIS, Geographisches Informationssystem der Kärntner Landesregierung: *Laserscanning Beispieldatensatz*. http://www.kagis.ktn.gv.at/35403_DE%2dGeodaten%2dLaserscanning/, Seitenzugriff: 11.11.2009, 2009
- [KER-05] KERSCHNER, Martin: *Die Nutzung von 3D Stadtmodellen auf GIS Arbeitsplätzen*. http://www.agit.at/php_files/myAGIT/papers/2005/5232.pdf, Seitenzugriff: 17.08.2009, 2005
- [KOP-02] KOPPERS, Lothar: *Generierung von Objekten für 3D-Stadtmodelle*. München, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität der Bundeswehr München, 2002
- [LAN-09] Landesvermessungsamt Baden-Württemberg: *Testdaten DGM/DLM*. http://www.lv-bw.de/lvshop2/Produktinfo/testdatencd_rom/rubrik/beschreibung/modell/dgm_dlm.html, Seitenzugriff: 12.08.2009
- [LAY-03] LAYCOCK, R., DAY, A.: *Automatically generating roof models from building footprints*. WSCG, Pilsen, 2003, S. 81 – 84
- [LOR-96] LORBER, G.: *Aufbau des 3D-Stadtmodells Graz*. Beiträge zum XII. Internationalen Kurs für Ingenieurvermessung, Band 2, Bonn, Dümmler Verlag, 1996, S. D8-D8/8
- [MAA-05] MAAS, Hans-Gerd: *Akquisition von 3D GIS Daten durch Flugzeuglaserscanning*. Kartographische Nachrichten, Vol. 55, Heft 1, 2005, S. 3 – 11
- [ÖBB-09] Österreichische Bundesbahnen – Immobilienmanagement GmbH: *Hauptbahnhof Wien*. http://www.oebb-immobilien.at/de/Projektentwicklung/Hauptbahnhof_Wien/, Seitenzugriff: 15.08.2009, 2009
- [RIE-08] RIEDL, Doris, RIEDL, Andreas: *Einführung in die Geoinformation – Begleittext zur Vorlesung*. <http://hal.geo.univie.ac.at/karto/lehr/fachbereiche/geoinfo/egi08/tutorials/theorie/EGI08script.pdf>, Seitenzugriff: 20.08.2009, 2008
- [ROT-01] ROTTENSTEINER, Franz: *Halbautomatische Gebäudeauswertung durch Integration von hybrider Ausgleichung und 3D Objektmodellierung*. Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation (PFG), Heft 4/2001, 2001, S. 289 – 301
- [STÄ-04] Städtetag Nordrhein-Westfalen: *3D-Stadtmodelle – Eine Orientierungshilfe*. AG 3D-Stadtmodelle des AK Kommunales Vermessungs- und Liegenschaftswesen des Städtetages NRW, http://www.wuppertal.de/geodaten/publikationen/3d_kiepe.pdf, Seitenzugriff: 08.08.2009, 2004
- [STÄ-07] Städtetag Nordrhein-Westfalen, SIG 3D: *Fortführung von 3D-Stadtmodellen*. AG "Fortführung von 3D-Stadtmodellen" des Städtetages NRW und der SIG 3D, http://www.ikg.uni-bonn.de/fileadmin/sig3d/pdf/Fortfuehrung_3DStM_Zwischenbericht.pdf, Seitenzugriff: 02.09.2009, 2007
- [SVW-09] Stadtvermessung Wien: *Dreidimensionales Stadtmodell*. <http://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/stadtvermessung/geodaten/>, Seitenzugriff: 19.11.2009, 2009
- [STE-00] STEINHAGE, Volker: *CAD-basierte Modellierungstechniken zur Generierung von 3D-Stadtmodellen aus Luftbildern*. Tutorial zur Umweltinformatik 2000, Bonn, Metropolis Publ., 2000, S. 367-377

- [STE-06] STEINNOCHER, Klaus: *Fernerkundung 1 – Begleittext zur Vorlesung*. 2006
- [STM-09] GIS-Steiermark: *Digitaler Atlas Steiermark*. <http://gis2.stmk.gv.at/gis2.stmk.gv.at/gis/da/init.aspx?karte=adr>, Seitenzugriff: 23.08.2009, 2009
- [SUG-08] SUGIHARA, Kenichi, HAYASHI, Yoshitugu: *Automatic Generation of 3D Building Models with Multiple Roofs*. Tsinghua Science and Technology Volume 13 Number S1, October 2008, 2008, S. 368-374
- [TER-01] TERBAHL, Martina: *Perlen der Informatik – Seminararbeit*. <http://wwwcs.uni-paderborn.de/cs/ag-madh/vorl/Perlen/Terbahl.ps.gz>, Seitenzugriff: 18.09.2009, 2001
- [ULM-06] ULM, Kilian, POLI, Daniela: *3D City Modelling with CyberCity-Modeler*. 1st EARSeL Workshop of the SIG Urban Remote Sensing: Humboldt-Universität, Berlin, 2006
- [VRE-09] Microsoft: *Virtual Earth*. <http://maps.bing.com>, Seitenzugriff: 08.11.2009, 2009
- [WAC-03] Wack, Roland, PAAR, Gerhard, NAUSCHNEGG, Bernhard, URBAN, Helmut: *Erzeugung von 3D Stadtmodellen*. <http://www.mplusm.at/ifg/download/Wack.pdf>, 2003
- [WIK-09a] Wikipedia: *Boundary Representation*. http://de.wikipedia.org/wiki/Boundary_Representation/, Seitenzugriff: 15.09.2009, 2009
- [WIK-09b] Wikipedia: *Constructive Solid Geometry*. http://de.wikipedia.org/wiki/Constructive_Solid_Geometry/, Seitenzugriff: 14.09.2009, 2009
- [WIK-09c] Wikipedia: *Dach*. <http://de.wikipedia.org/wiki/Dach/>, Seitenzugriff: 08.08.2009, 2009
- [WIK-09d] Wikipedia: *Geometrische Modellierung*. http://de.wikipedia.org/wiki/Geometrische_Modellierung/, Seitenzugriff: 16.09.2009, 2009
- [WIK-09e] Wikipedia: *Graz*. <http://de.wikipedia.org/wiki/Graz/>, Seitenzugriff: 07.11.2009, 2009
- [WIK-09f] Wikipedia: *Kataster*. <http://de.wikipedia.org/wiki/Kataster/>, Seitenzugriff: 23.08.2009, 2009
- [WIK-09g] Wikipedia: *Orientierung (innere, äußere)*. http://de.wikipedia.org/wiki/Innere_und_%C3%A4u%C3%9Fere_Orientierung, Seitenzugriff: 29.08.2009, 2009
- [WIK-09h] Wikipedia: *Pulldach*. <http://de.wikipedia.org/wiki/Pulldach/>, Seitenzugriff: 11.08.2009, 2009
- [WIK-09i] Wikipedia: *Shapefile*. <http://en.wikipedia.org/wiki/Shapefile>, Seitenzugriff: 11.11.2009, 2009
- [WRI-07] WRIGHT, Richard, LIPCHAK, Benjamin, HAEMEL, Nicholas: *OpenGL Superbible, 4. ed.* Addison-Wesley, 2007

Lebenslauf

PERSÖNLICHE DATEN

Name: Christian Sam

Geburtsdatum: 9. Juni 1982

Geburtsort: Wien

Staatsbürgerschaft: Österreich

AUSBILDUNG

1988 – 1992: Volksschule II Tulln

1992 – 1996: BG/BRG Tulln

1996 – 2000: HTL Schellingschule Wien, Nachrichtentechnik

2002 – 2003: FH Technikum Wien, Elektronische Informationsdienste

2003 – 2005: Universität Wien, Diplomstudium Geographie

seit 2005: Universität Wien, Diplomstudium Geographie im Studienzweig
Kartographie und Geoinformation

GRUNDWEHRDIENST

2001 – 2002: Kaserne Fliegerhorst Brumowsky, Langenlebarn

BERUFLICHE ERFAHRUNG

2005, 2006 Tutor am Institut für Geographie und Regionalforschung der Universität
Wien

2006 Praktikum am Institut für Militärisches Geowesen des Bundesministerium
für Landesverteidigung

2007 Studienassistent am Institut für Geographie und Regionalforschung der
Universität Wien

2007, 2008 Praktikum bei Austro Control: Air Traffic Management

Ich versichere:

- dass ich die Diplomarbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfe bedient habe.
- dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin/ einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.
- dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Datum

Unterschrift