

Ein Konzept zur integrierten Modellierung von Detailstufen für 3D-Gebäudemodelle

IZABELA KARUT¹, ANDREAS WICHMANN¹, YEVGENIYA FILIPPOVSKA¹ & MARTIN KADA¹

Zusammenfassung: 3D-Stadtmodelle werden in unterschiedlichsten Anwendungsgebieten verwendet. Die darin enthaltenen Gebäudemodelle weisen oftmals einen hohen Detaillierungsgrad auf, der jedoch nicht immer benötigt wird. Damit der Detaillierungsgrad den Bedürfnissen der Anwendung entsprechend angepasst werden kann, wurden verschiedene Datenmodelle entwickelt, welche mehrere Detailstufen eines Objektes vorhalten. Die gesonderte Speicherung dieser Detailstufen beinhaltet jedoch zwangsläufig Redundanzen, welche in Folge von Aktualisierungsvorgängen zu Inkonsistenzen führen können. In diesem Artikel wird ein Konzept vorgestellt, welches eine integrierte Modellierung mehrerer Detailstufen eines Gebäudes ermöglicht, um Redundanzen zu vermeiden. Die Gültigkeit dieses Konzepts wird anhand eines Testdatensatzes demonstriert.

1 Einleitung

Die Nachfrage nach 3D-Stadtmodellen ist in den letzten Jahren deutlich gestiegen. Sie werden mittlerweile in vielfältigen Anwendungsfeldern wie der Stadt- und Raumplanung, Umweltanalyse und Navigation eingesetzt. Obgleich die darin enthaltenen Gebäude eine immer höhere Detaillierung aufweisen können, entstehen durch die Vielfalt der Anwendungen häufig unterschiedliche Anforderungen diesbezüglich. Aus diesem Grund wurden Datenmodelle wie beispielsweise CityGML (KOLBE et al. 2005) eingeführt, welches es ermöglicht mehrere Detailstufen (LODs) von ein und demselben Gebäude vorzuhalten. Somit kann je nach Aufgabenstellung das für den gewünschten Zweck geeignetste Modell ausgewählt werden. Diesem Konzept liegt jedoch die gesonderte Speicherung jeder vorhandenen Detailstufe zugrunde, was bei verschiedenen geometrischen Ausprägungen eines Gebäudes zwangsläufig zu Redundanzen führt. Die negativen Folgen einer solchen redundanten Speicherung zeigen sich einerseits in einer deutlichen Erhöhung der abzuspeichernden Datenmenge. Andererseits wirkt sich eine redundante Speicherung auch negativ auf den Aufwand für das Management der Daten aus, da u.a. die Vermeidung von Inkonsistenzen infolge von Aktualisierungsvorgängen sichergestellt werden muss. Beide Problematiken werden insbesondere in solchen Fällen noch weiter verschärft, in denen sehr viele diskrete Detailstufen eines Gebäudes mit jeweils nur geringfügigen Änderungen vorgehalten werden. Um Redundanzen in der abzuspeichernden Datenmenge zu vermeiden, werden in den unterschiedlichsten Disziplinen Modellierungskonzepte zur Speicherung und Darstellung von 3D-Objekten mit mehreren LODs verwendet. In der Computergrafik beispielsweise werden häufig kontinuierliche Detailstufen eingesetzt, um die darzustellenden Details einer Szene zu reduzieren. Dabei werden solche Details eines Objektes ausgeblendet, welche aufgrund der Entfernung zum Beobachter kaum oder nicht mehr wahrnehmbar sind. Um die abzuspeichernde Datenmenge

¹ Technische Universität Berlin, Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik, Straße des 17. Juni 135, D-10623 Berlin, E-Mail: [Vorname.Nachname]@tu-berlin.de

für kontinuierliche Detailstufen gering zu halten, wird jedes darzustellende Objekt nur ein einziges Mal, und zwar in seiner höchsten Detailstufe, abgespeichert. Die Reduzierung von Details erfolgt dann durch die Anwendung unterschiedlicher Flächensimplifizierungsalgorithmen. In Bezug auf die Darstellung von Gebäuden ergeben sich jedoch wesentliche Nachteile in der realistischen Darstellung. So lassen sich zwar unterschiedliche LODs eines Gebäudemodelles erzeugen und abspeichern, jedoch bleiben gebäudecharakteristische Eigenschaften nicht immer zwangsläufig erhalten (KADA et al. 2016).

In diesem Artikel wird ein Konzept zur integrierten Modellierung von Detailstufen für 3D-Gebäudemodelle vorgestellt, das nicht auf eine diskrete Anzahl von Detailstufen limitiert ist. Es basiert auf einer Zellenzerlegung, die das abzuspeichernde Gebäude in disjunkte Zellen aufteilt, sodass jeder Zelle eine oder mehrere Detailstufen zugeordnet werden können. Die Zuordnung mehrerer Detailstufen ermöglicht die wiederholte Verwendung der in der Zelle repräsentierten Geometrie für unterschiedliche Detailstufen. Somit lassen sich Redundanzen in der Datenspeicherung vermeiden. Die Vorteile der vorgestellten Modellierung zeigen sich neben der redundanzfreien Datenhaltung auch in deren Flexibilität. Um dies zu demonstrieren, wird des Weiteren ein Konzept zur Erzeugung von Gebäudemodellen mit gemischten Detailstufen vorgestellt. Es basiert auf der Dekomposition des vom abzuspeichernden Gebäude eingenommenen Raumes und ermöglicht es jedem dieser Teilräume eine eigene Detailstufe zuzuordnen.

2 Relevante Arbeiten

Eines der bekanntesten Datenmodelle zur Speicherung von Gebäuden mit mehreren Detailstufen ist CityGML, das u.a. in KOLBE & GRÖGER (2003) vorgestellt wird. CityGML wird seit 2008 als OGC-Standard zur Repräsentation und zum Austausch virtueller 3D-Stadtmodelle eingesetzt. Als de-facto Standard ist CityGML international anerkannt und wird in vielen Ländern für unterschiedlichste Anwendungsfelder herangezogen (LÖWNER et al. 2016). Es ermöglicht das Vorhalten diskreter Gebäudemodelle in fünf verschiedenen Detailstufen, wobei drei dieser fünf Detailstufen (LOD_1 - LOD_3) bereits in früheren Ansätzen definiert wurden (COORS & FLICK 1998).

Obgleich CityGML als Standard viele Vorteile in Bezug auf die vielseitige Verwendung von Gebäudemodellen bietet, werden bereits in unterschiedlichen wissenschaftlichen Arbeiten die mit den fünf diskreten Detailstufen einhergehenden Einschränkungen diskutiert. Zu den häufigsten Kritikpunkten zählen dabei u.a. die geringe Anzahl an definierten Detailstufen, das Fehlen einer präzisen Definition der einzelnen Detailstufen und das Fehlen von Beziehungen zwischen den verschiedenen Detailstufen (STOTER et al. 2011). Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wurden von BILJECKI et al. (2016) eine Erweiterung des Detailierungskonzepts für 3D-Gebäudemodelle von fünf auf sechzehn Detailstufen vorgeschlagen. Das Problem der redundanten Datenhaltung durch den Anstieg auf sechzehn Detailstufen wird dadurch jedoch nur noch weiter verschärft. Eine ähnliche Problematik bezüglich einer redundanzfreien Datenhaltung weist auch die in BENNER et al. (2013) vorgestellte Modellierung von 3D-Stadtmodellen auf, bei der zwischen einer geometrischen Detailebene und einer semantischen Detailebene unterschieden wird.

Neben der Verwendung von diskreten Detailstufen werden beispielsweise in der Computergrafik auch kontinuierliche Detailstufen verwendet. Dabei wird oftmals nur die höchste Detailstufe ei-

nes Modells als Dreiecksnetz abspeichert und dieses dann durch Anwendung von Methoden der Flächensimplifizierung iterativ vereinfacht. Ein häufig eingesetztes Flächensimplifizierungsverfahren ist zum Beispiel das Edge-Collapse-Verfahren. Hierbei werden zwei durch eine Kante verbundene Knoten zu einem einzigen Knoten zusammengeführt, sodass die ursprünglich vorhandene Kante aus dem Modell entfernt wird. Durch die iterative Anwendung mehrerer Edge-Collapse-Operationen können so Details aus dem zu repräsentierenden Objekt kontinuierlich entfernt werden. Varianten dieses Flächensimplifizierungsverfahrens werden in HOPPE (1996), GUÉZIEC (1995) und RONFARD & ROSSIGNAC (1996) näher beschrieben und unterscheiden sich im Wesentlichen durch die Selektion der zu reduzierenden Kanten. Ein weiteres Flächensimplifizierungsverfahren stellt das Vertex-Clustering-Verfahren dar, das eine Menge nahe beieinanderliegender Knoten zu einem einzigen Knoten vereint; siehe z.B. ROSSIGNAC & BORREL (1993) und (SCHAEFFER 2007). Einen umfassenden Überblick über weitere Methoden der Flächensimplifizierung bieten LUEBKE (1997) und BOTSCH et al. (2010). Ein wesentlicher Vorteil dieser Konzepte ist, dass Objekte nur in ihrer höchsten Detailstufe zusammen mit einer Simplifizierungsvorschrift vorgehalten werden müssen, wodurch sich eine redundanzfreie Speicherung ergibt. Eine Datenstruktur, die sich für die Speicherung kontinuierlicher Detailstufen und insbesondere auch allgemein für die Ergebnisse eines Generalisierungsprozesses eignet, ist beispielsweise die tGap-Datenstruktur (VAN OOSTEROM 2005). In dieser werden kontinuierliche Detailstufen in einer Baumstruktur repräsentiert, wobei in den Blättern die höchste Detailstufe und in den Elternknoten nur die Generalisierungsmethode für die Kindknoten und nicht die Geometrie selbst repräsentiert ist. Auch wenn mit solchen Konzepten generell eine redundanzfreie Speicherung ermöglicht wird, so ist jedoch ein wesentlicher Nachteil, dass für die Generierung einer geringen Detailstufe oftmals zunächst alle Repräsentationen höheren Details erzeugt werden müssen.

3 Konzeptuelles Modell

In dem hier vorgestellten Konzept zur integrierten Modellierung von 3D-Gebäudemodellen wird auf die gesonderte Speicherung jeder Detailstufe verzichtet. Dazu werden alle einem Gebäude zugehörigen LODs mittels einer Zellerlegung in eine Menge von disjunkten Komponenten zerlegt. Diese Komponenten repräsentieren jeweils eine Teilmenge, die in einer oder mehreren Detailstufen vorkommt. Dabei werden die Komponenten in eine Basiskomponente und mehrere Detailstufenkomponenten unterteilt. Die Basiskomponente repräsentiert den Teil, den alle LODs gemeinsam haben, während die Detailstufenkomponenten nur Teil bestimmter Detailstufen sind. Eine genaue Definition zur Generierung dieser Komponenten wird in Abschnitt 3.1 gegeben.

Für die Rückgewinnung der ursprünglichen Detailstufen eines Gebäudes wird in Abschnitt 3.2 ein Verfahren vorgestellt, das die Basiskomponente des wiederherzustellenden Gebäudes mit den notwendigen Detailstufenkomponenten vereinigt.

Um die Flexibilität und Vorteile des hier vorgestellten integrierten Modells für verschiedenste Anwendungen zu demonstrieren, wird eine Erweiterung für die Rückgewinnung von gemischten Detailstufen vorgestellt. Dazu wird der vom Gebäude eingenommene Raum in disjunkte Zellen unterteilt und jeder dieser Zellen eine der Anwendung erforderlichen Detailstufe zugewiesen. Die gemischte Detailstufe ergibt sich dann durch die in Abschnitt 3.3 vorgestellte Vereinigung.

Somit lassen sich nicht nur die ursprünglichen Detailstufen wiederherstellen, sondern auch verschiedenste Detailstufenkombinationen generieren.

3.1 Basiskomponente & Detailstufenkomponenten

Basierend auf den standardisierten Grundlagen der Objektmodellierung werden Objekte im weiteren Verlauf als Teilmengen eines topologischen Raums betrachtet, wodurch mengentheoretische Boolesche Operatoren angewendet werden können. Sei dazu $S = \{LOD_1, \dots, LOD_n\}$ eine Menge von n Repräsentationen eines Gebäudes in unterschiedlichen Detailstufen und C die Menge der durch das integrierte Modell erzeugten Komponenten. Jedes Element $C_I \in C$ mit $I \subseteq \{1, \dots, n\} = N$ ist dann definiert durch:

$$C_I = \bigcap_{i \in I} LOD_i \setminus \bigcup_{j \in N \setminus I} LOD_j \quad (1)$$

Im Folgenden wird aus Gründen der Lesbarkeit auf Mengenkammern in Indizes verzichtet. Unter Berücksichtigung von Gleichung (1) wird folglich für die Erzeugung einer Komponente die Schnittmenge der LODs in S gebildet, deren Index ein Element im Index der zu erzeugenden Komponente ist. Anschließend wird von dieser Schnittmenge die Vereinigung der in S verbliebenen Elemente subtrahiert. Die Komponente bei der beispielsweise $I = N$ gilt repräsentiert die Komponente $C_{1,\dots,n}$. Da diese Komponente in allen Detailstufen enthalten ist, wird sie im Folgenden als Basiskomponente bezeichnet und ist dementsprechend allen LODs in S zugeordnet. Die übrigen Komponenten, die somit Elemente der Menge $C \setminus C_N$ sind, bilden die Menge der Detailstufenkomponenten. Im Gegensatz zur Basiskomponente ist eine Detailstufenkomponente nicht jedem LOD zugeordnet, sondern nur einer echten Teilmenge von S . Die Zuordnung einer Detailstufenkomponente zu bestimmten LODs ergibt sich durch deren Index I . So ist beispielsweise die Komponente $C_{1,3,9}$ den LODs der Menge $\{LOD_1, LOD_3, LOD_9\}$ zugeordnet.

Um eine redundanzfreie Speicherung der LODs zu ermöglichen, müssen die Komponenten in C disjunkt sein. Dies wird durch die Differenzbildung in Gleichung (1) sichergestellt, bei der einzig im Falle der Basiskomponente der zweite Operand der Differenz der leeren Menge entspricht. Somit beinhaltet jede Detailstufenkomponente nur solche Details, die ausschließlich in allen mit dieser Komponente assoziierten LODs repräsentiert sind. Generell ist bei der Anwendung von Gleichung (1) zur Erzeugung der Komponenten festzustellen, dass die Anzahl der zu berechnenden Kombinationen exponentiell mit der Anzahl der Detailstufen wächst. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Anzahl an zu erzeugenden Komponenten durch die Elementanzahl der Potenzmenge \mathcal{P} von S gegeben ist, sodass $|C| = |\mathcal{P}(S)| = 2^n$ gilt. In der Praxis jedoch entspricht ein großer Anteil der Elemente in C der leeren Menge, sodass diese Komponenten nicht weiter berücksichtigt oder abgespeichert werden müssen.

In den folgenden Abbildungen wird exemplarisch an einem konkreten Beispiel für die abzuspeichernden LODs der Menge $S = \{LOD_1, LOD_2, LOD_3, LOD_4\}$ aufgezeigt, wie die Basiskomponente $C_{1,2,3,4}$ und die Detailstufenkomponenten C_1 und $C_{2,3,4}$ anhand von Gleichung (1) generiert werden. In Abbildung 1 ist die Erstellung der Basiskomponente dargestellt. Der erste Operand der Differenz bildet die Schnittmenge aller Detailstufen eines Gebäudemodells ab. Da jede vorhandene Detailstufe bereits in den ersten Operanden eingeht, bildet der zweite Operand die leere Menge. Somit ergibt sich die Basiskomponente aus der Schnittmenge aller Detailstufen eines

Gebäudemodells. Diese Aussage trifft nicht nur auf das aufgezeigte Beispiel zu, sondern ist allgemeingültig für die Generierung von Basiskomponenten.

$$C_{1,2,3,4} = \left(\begin{array}{c} \text{[Diagram of } C_{1,2,3,4} \text{]} \\ C_{1,2,3,4} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{[Diagram of } LOD_1 \text{]} \\ LOD_1 \end{array} \cap \begin{array}{c} \text{[Diagram of } LOD_2 \text{]} \\ LOD_2 \end{array} \cap \begin{array}{c} \text{[Diagram of } LOD_3 \text{]} \\ LOD_3 \end{array} \cap \begin{array}{c} \text{[Diagram of } LOD_4 \text{]} \\ LOD_4 \end{array} \right) \setminus \emptyset$$

Abb. 1: Generierung der Basiskomponente $C_{1,2,3,4}$ aus den vier Detailstufen eines Gebäudes basierend auf Gleichung (1)

Die Generierung der Detailstufenkomponente C_1 ist in Abbildung 2 dargestellt. Im Gegensatz zur Generierung der Basiskomponente besteht hier die zu verschneidende Menge nicht aus allen Komponenten, sondern, dem Komponentenindex I folgend, aus der Menge $\{LOD_1\}$. Dadurch müssen im zweiten Operanden der Differenz die restlichen Detailstufen LOD_2, LOD_3 und LOD_4 vereinigt und anschließend von LOD_1 abgezogen werden. Dadurch repräsentiert die Detailstufenkomponente C_1 die leere Menge und muss somit nachfolgend nicht weiter berücksichtigt werden.

$$C_1 = \left(\begin{array}{c} \text{[Diagram of } LOD_1 \text{]} \\ LOD_1 \end{array} \right) \setminus \left(\begin{array}{c} \text{[Diagram of } LOD_2 \text{]} \\ LOD_2 \end{array} \cup \begin{array}{c} \text{[Diagram of } LOD_3 \text{]} \\ LOD_3 \end{array} \cup \begin{array}{c} \text{[Diagram of } LOD_4 \text{]} \\ LOD_4 \end{array} \right)$$

Abb. 2: Generierung der Detailstufenkomponente C_1 basierend auf Gleichung (1)

Die Generierung der Detailstufenkomponente $C_{2,3,4}$ wird in Abbildung 3 illustriert. Der erste Operand der Differenz ergibt sich in diesem Fall aus der Verschneidung der Menge $\{LOD_2, LOD_3, LOD_4\}$, wodurch der zweite Operand aus der einelementigen Menge $\{LOD_1\}$ besteht. Aus den Elementen des ersten Operanden wird die Schnittmenge gebildet und anschließend der zweite Operand abgezogen. Das Ergebnis liefert die Detailstufenkomponente $C_{2,3,4}$, welche ausschließlich für die Generierung der Detailstufen LOD_2, LOD_3 und LOD_4 benötigt wird.

$$C_{2,3,4} = \left(\begin{array}{c} \text{[Diagram of } LOD_2 \text{]} \\ LOD_2 \end{array} \cap \begin{array}{c} \text{[Diagram of } LOD_3 \text{]} \\ LOD_3 \end{array} \cap \begin{array}{c} \text{[Diagram of } LOD_4 \text{]} \\ LOD_4 \end{array} \right) \setminus \left(\begin{array}{c} \text{[Diagram of } LOD_1 \text{]} \\ LOD_1 \end{array} \right)$$

Abb. 3: Generierung der Detailstufenkomponente $C_{2,3,4}$ basierend auf Gleichung (1)

Werden die Basiskomponente und alle Detailstufenkomponenten des vorangegangenen Beispiels mit dem Konzept des vorgestellten integrierten Modells generiert, so müssen insgesamt sechzehn Komponenten berechnet werden. Die Anzahl der zu berechnenden Komponenten ergibt sich aus der Potenzmenge der vier vorhandenen LODs. In diesem Beispiel entsprechen zwölf der sech-

zehn Komponenten der leeren Menge. Somit müssen insgesamt nur die in Abbildung 4 dargestellten vier Komponenten bestehend aus der Basiskomponente $C_{1,2,3,4}$ und den drei Detailstufenkomponenten $C_{1,2}$, $C_{2,3,4}$ und C_4 abgespeichert werden.

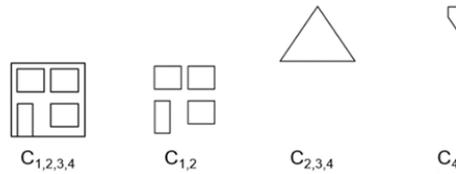


Abb. 4: Die Basiskomponente und Detailstufenkomponenten für das Beispielgebäude in vier verschiedenen Detailstufen

3.2 Rückgewinnung von Detailstufen

Die Rückgewinnung einer Detailstufe erfolgt durch das Zusammenfügen sämtlicher Komponenten, die mit der jeweiligen Detailstufe assoziiert sind. Sei eine Menge $S = \{LOD_1, \dots, LOD_n\}$ gegeben, die entsprechend Abschnitt 3.1 in Basiskomponente und Detailstufenkomponenten vorliegt, so ist die Rückgewinnung einer Detailstufe LOD_k mit $k \in \{1, \dots, n\} = N$ wie folgt definiert:

$$LOD_k = \bigcup_{I|k \in I \subseteq N} C_I \tag{2}$$

Da für die Basiskomponente $I = \{1, \dots, n\}$ und somit für alle $k \in I$ gilt, wird sie für die Rückgewinnung jeder Detailstufe benötigt. Detailstufenkomponenten werden hingegen entsprechend ihrem Index I einzig für die Rückgewinnung einer oder mehrerer aber nicht für alle Detailstufen benötigt. Die Basiskomponente wird Gleichung (2) folgend zusammen mit den entsprechenden Detailstufenkomponenten vereinigt, wodurch sich das Gebäudemodell einer bestimmten Detailstufe ergibt. Eine positive Eigenschaft des hier vorgestellten Konzepts zur integrierten Modellierung von Detailstufen und deren Rückgewinnung ist, dass jede Detailstufe direkt erzeugt werden kann, ohne dass Abhängigkeiten zu anderen Detailstufen berücksichtigt werden müssen. Ein Beispiel für die Rückgewinnung der Detailstufe LOD_2 für das in Abschnitt 3.1 eingeführte Gebäude mit vier Detailstufen ist in Abbildung 5 dargestellt. Hierzu wird die Basiskomponente $C_{1,2,3,4}$ mit den zwei Detailstufenkomponenten $C_{1,2}$ und $C_{2,3,4}$ vereinigt.

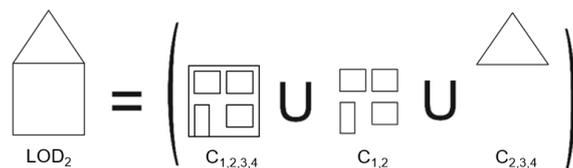


Abb. 5: Rückgewinnung der Detailstufe LOD_2 durch die Vereinigung der Basiskomponente mit den entsprechenden Detailstufenkomponenten

In Abbildung 6 ist ein weiteres Beispiel für die Rückgewinnung einer Detailstufe (LOD_3) dargestellt. Da nur zwei der in Abbildung 4 dargestellten Komponenten im Index I das Element 3

aufweisen, ist für die Rückgewinnung dieser Detailstufe die Vereinigung der Basiskomponente mit der Detailstufenkomponente $C_{2,3,4}$ ausreichend.

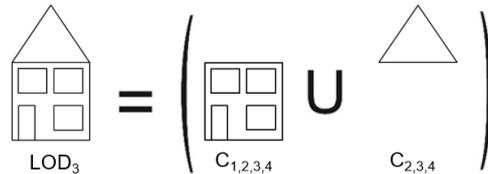


Abb. 6: Rückgewinnung der Detailstufe LOD_3 durch die Vereinigung der Basiskomponente mit der Detailstufenkomponente $C_{2,3,4}$

3.3 Rückgewinnung von gemischten Detailstufen

Um ein Gebäudemodell auch in gemischten Detailstufen darstellen zu können, wird der vom Gebäude eingenommene Raum zunächst so in überlappungsfreie Teilräume aufgeteilt, dass sie nach MÄNTYLÄ (1988) der Definition eines Dekompositionsmodells folgend den zu modellierenden Raum vollständig repräsentieren. In der Praxis setzt sich das Dekompositionsmodell häufig aus Teilräumen einfacher Geometrien (z.B. Quader) zusammen, die beispielsweise die Stockwerke oder Treppenhausbereiche des Gebäudes repräsentieren. Jedem dieser Teilräume wird dann, in Abhängigkeit von der späteren Verwendung des Gebäudemodells, eine eigene Detailstufe zugewiesen, sodass eine Vielzahl unterschiedlichster Dekompositionsmodelle konstruiert werden kann.

Sei für die Rückgewinnung von gemischten Detailstufen ein Dekompositionsmodell $D = \{d_1, \dots, d_m\}$ mit m Teilräumen und eine Funktion f gegeben, welche den Index der mit dem Element $d \in D$ assoziierten Detailstufe aus der Menge $S = \{LOD_1, \dots, LOD_n\}$ liefert, so ist die Rückgewinnung einer gemischten Detailstufe wie folgt definiert:

$$LOD_{gemischt} = \bigcup_{d \in D} \bigcup_{l | f(d) \in l} d \cap C_l \quad (3)$$

Durch die Anwendung dieser Gleichung auf eine gegebene Menge S an Detailstufen und einem Dekompositionsmodell D können Gebäude entsprechend dem jeweiligen Anwendungszweck mit individuell gemischten Detailstufen generiert werden.

4 Ergebnisse & Diskussion

Die Gültigkeit des vorgeschlagenen Konzepts wurde exemplarisch anhand eines manuell konstruierten 3D-Straßenblocks mit insgesamt sechs Gebäudeobjekten verifiziert (vgl. Abbildung 7). Aus den insgesamt vier modellierten Detailstufen wurden die Basiskomponente und die Detailstufenkomponenten anhand von Gleichung (1) gemäß der dargestellten Methodik erzeugt. Jede dieser Komponenten besteht aus einer Sammlung von Objekten, die in ihrer Gesamtheit disjunkt sind. Unter Verwendung von Gleichung (2) können mit diesen Komponenten erwartungsgemäß die ursprünglichen Detailstufen rückgewonnen werden, was in dem dargestellten Beispiel durch die vier Detailstufen gezeigt wird.

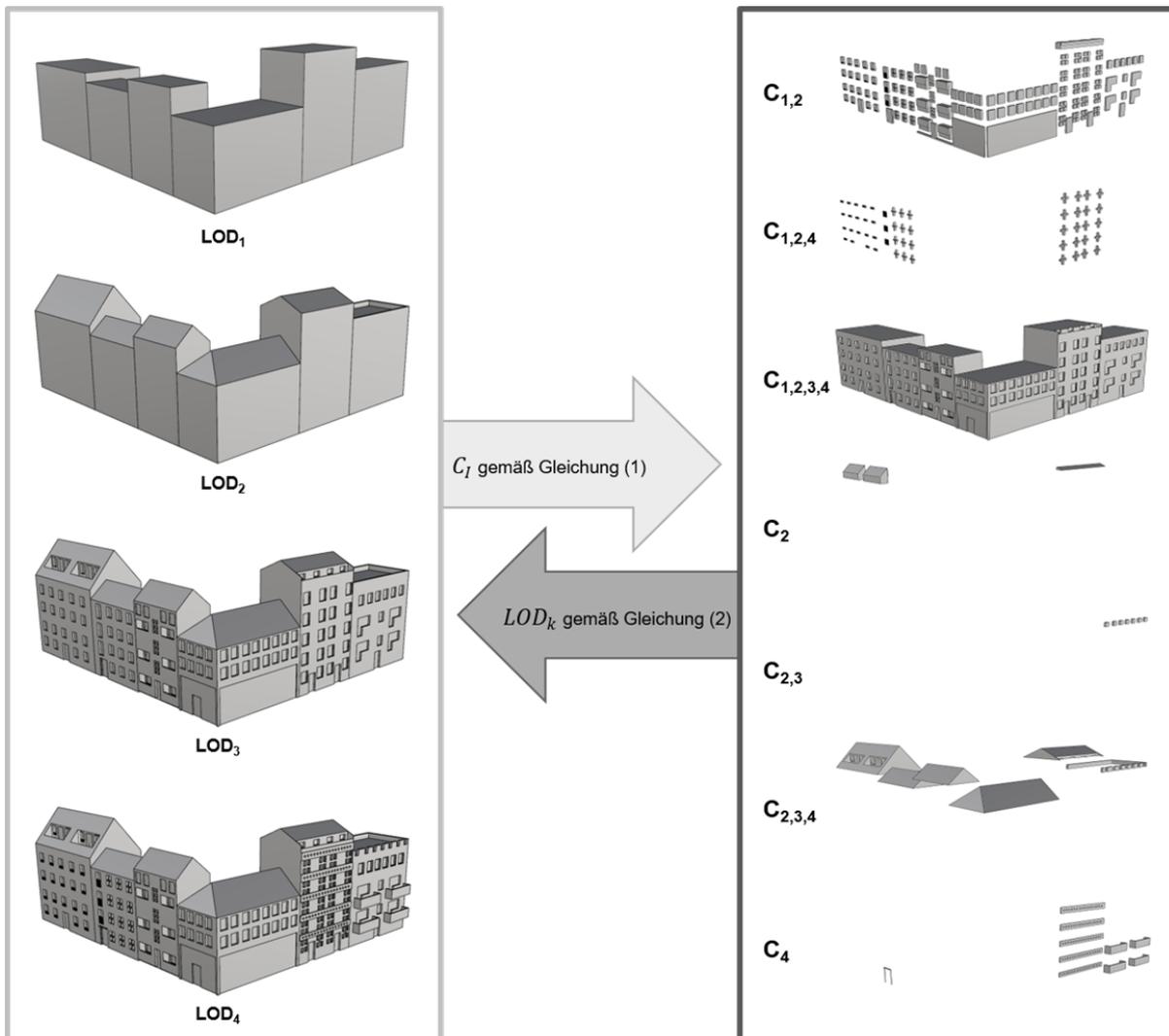


Abb. 7: Ein Gebäudeblock in vier Detailstufen und die sich durch das integrierte Modell ergebenden Komponenten

Ein Beispiel zur Generierung von Gebäuden in gemischten Detailstufen ist in Abbildung 8 dargestellt. Hierzu wurde ein Dekompositionsmodell erstellt, das aus neun Teilräumen besteht. Diese repräsentieren die Aufteilung der einzelnen Stockwerke des Gebäudes und unterteilen, mit Ausnahme des Daches, jedes Stockwerk in einen linken und rechten Wohnbereich. Jedem dieser Teilräume wurde dann ein Detaillierungsgrad zugewiesen. Anschließend wurden die mit dem Dekompositionsmodell assoziierten Komponenten gemäß Gleichung (3) vereinigt und zu einem Gesamtmodell zusammengeführt. Das Ergebnis des zusammengeführten Gesamtmodells ist das in Abbildung 8 dargestellte Gebäude in gemischten Detailstufen. Durch diese Flexibilität wird eine individuelle Anpassung eines Gebäudes ermöglicht, die auf eine spezifische Aufgabenstellung angepasst werden kann.

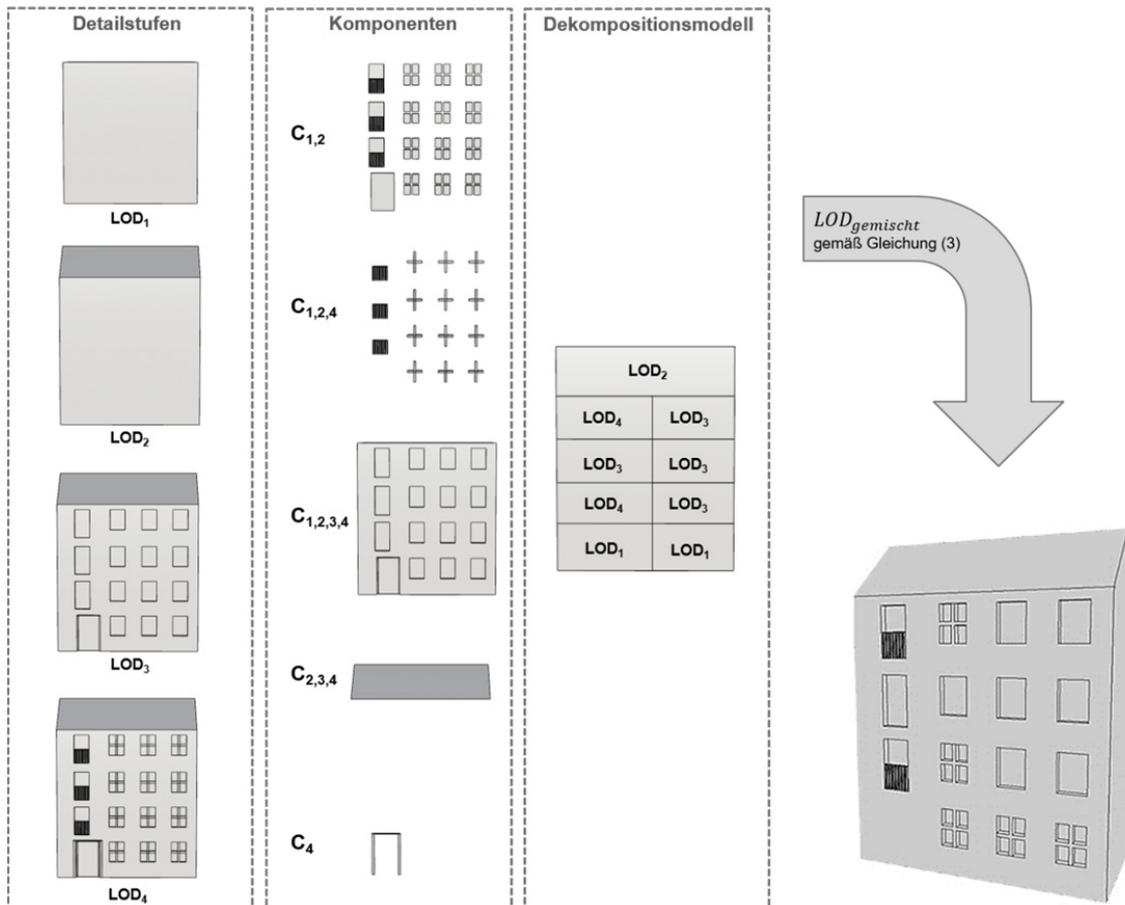


Abb. 8: Erstellung eines Gebäudes in Mischformdarstellung unter Verwendung der entsprechenden Komponenten für jede Zelle des Dekompositionsmodells

Die durchgeführten Experimente belegen, dass durch die Umsetzung des integrierten Modells nicht jede Detailstufe einzeln abgespeichert werden braucht und dass dadurch eine redundante Datenhaltung vermieden werden kann. Jedoch zeigt sich, dass durch das integrierte Modell neue Flächen eingeführt wurden, die nicht in den ursprünglichen Detailstufen vorhanden waren. Diese Flächen sind dadurch begründet, dass die Objekte einer Komponente als geschlossene Festkörper abgespeichert werden. Bei der Rückgewinnung der ursprünglichen Detailstufen fallen diese durch die Vereinigung weg. Verwendung können diese Flächen jedoch bei der Generierung gemischter Detailstufen finden.

Ein weiterer Aspekt, den es auch zu untersuchen gilt, ist die realistische Darstellung eines Gebäudemodells in gemischten Detailstufen. So sollte das Dekompositionsmodell eine Aufteilung aufweisen, die der geometrischen Zusammensetzung des Gebäudes entspricht. Wird dies nicht eingehalten, so kann dies in Bezug auf Fassaden, Außenkomponenten und Dachstrukturen folgende negative Auswirkungen haben. Fenster und Türen einer Fassade können beispielsweise in mehrere Zellen unterteilt werden, wodurch die Darstellung in unterschiedlichen Detailstufen erfolgen kann, was wiederum das Gebäude realitätsfremd erscheinen lassen kann. Ähnlich verhält es sich auch wenn Außenkomponenten (z.B. Feuertreppen), Verbindungen (z.B. Bautenverbindungsbrücken) zwischen verschiedenen Gebäuden und Dachstrukturen in mehreren unter-

schiedlichen Detailstufen repräsentiert werden sollen. Übergänge zwischen den einzelnen Detailstufen können aber nicht nur aus geometrischer Sicht unrealistisch wirken, sondern können vor allem auch bei texturierten Objekten erkennbar auftreten.

5 Fazit & Ausblick

Das hier vorgestellte integrierte Modell ermöglicht die redundanzfreie Speicherung von Gebäudemodellen in unterschiedlichen Detailstufen. Die einzelnen Detailstufen dieser Gebäude können dabei fehlerfrei und ohne Verlust von Details direkt rückgewonnen werden, ohne dass Gebäudemodelle mit einer höheren Detailstufe zuvor erzeugt werden müssen, wie es beispielsweise bei den kontinuierlichen Detailstufen oftmals der Fall ist. Die vorgestellte Erweiterung des integrierten Modells ermöglicht es zudem gemischte Detailstufen anwendungsspezifisch zu generieren und gestattet dadurch eine sehr flexible Darstellung von Gebäuden.

Obgleich das integrierte Modell eine effiziente Speicherung bezüglich redundanzfreier Datenhaltung ermöglicht, besteht noch weiterer Forschungsbedarf im Hinblick auf den Speicherbedarf und möglichen realitätsfernen Darstellungen von Gebäuden in gemischten Detailstufen. So müssen für die im experimentellen Teil diskutierten Fehldarstellungen von Außenkomponenten noch Lösungsansätze entwickelt werden. Zum Beispiel könnte im Fall einer Feuertreppe der Detailgrad stets unabhängig von der Raumaufteilung des Dekompositionsmodells einheitlich definiert werden. Dadurch kann vermieden werden, dass eine Feuertreppe, die drei Stockwerken zugeordnet ist, unterbrochen wird, indem das mittlere Stockwerk in einer geringeren Detailstufe als das darüber- und darunterliegende repräsentiert wird. Ähnliche Überlegungen sind auch für Verbindungen zwischen verschiedenen Gebäuden anzustellen. Des Weiteren sollte zur Vermeidung einer unrealistischen Darstellung von Dachstrukturen darauf geachtet werden, dass nebeneinanderliegende Dachgeschosswohnungen in Bezug auf Fenster und Türen eine einheitliche Detaillierung aufweisen und dass das Dach entweder vollständig oder überhaupt nicht abgebildet wird. Sollte letzteres nicht berücksichtigt werden, so können beispielsweise Gebäudemodelle mit einem halben Dach entstehen.

Des Weiteren wäre eine automatische Generierung von Dekompositionsmodellen im Hinblick auf den Bearbeitungsaufwand wünschenswert, jedoch müssen dabei geometrische Eigenschaften eines Gebäudes zwangsläufig mitberücksichtigt werden.

Schließlich besteht auch noch weiterer Forschungsbedarf bezüglich der Rückgewinnungsmethode von Gebäudemodellen. So können die verwendeten komplexen Booleschen Operationen im 3D-Raum durch einfachere Klebeoperation, wie sie z.B. in MÄNTYLÄ (1988) vorgestellt wurden, ersetzt werden. Wie diese Klebeoperationen für das integrierte Modell umzusetzen sind, bleibt noch zu untersuchen.

6 Literaturverzeichnis

BENNER, J., GEIGER, A., GRÖGER, G., HÄFELE, K.H. & LÖWNER, M.O., 2013: Enhanced LOD Concepts for Virtual 3D City Models. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **II**(2/W1), 51-61.

- BILJECKI, F., LEDOUX, H. & STOTER, J., 2016: An Improved LOD Specification for 3D Building Models. *Computers, Environment and Urban Systems*, **59**, 25-37.
- BOTSCH, M., KOBELT, L., PAULY, M., ALLIEZ, P. & LÉVY, B., 2010: *Polygon Mesh Processing*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- COORS, V. & FLICK, S., 1998: Integrating Levels of Detail in a Web-based 3D-GIS. *Proceedings of the 6th ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems*, 40-45.
- GUÈZIEC, A., 1995: Surface Simplification with Variable Tolerance. *Proceedings of the 2nd Annual International Symposium on Medical Robotics and Computer Assisted Surgery '95*, 132-139.
- HOPPE, H., 1996: Progressive Meshes. *SIGGRAPH '96 Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 99-108.
- KADA, M., WICHMANN, A., FILIPPOVSKA Y. & HERMES T., 2016: Animation Strategies for Smooth Transformations Between Discrete LODs of 3D Building Models. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **41(B2)**, 413-420.
- KOLBE, T.H. & GRÖGER, G., 2003: Towards Unified 3D City Models. *Proceedings of the Joint ISPRS Commission IV Workshop on Challenges in Geospatial Analysis*.
- KOLBE, T.H., GRÖGER, G. & PLÜMER L., 2005: CityGML- Interoperable Access to 3D City Models. *Proceedings of the International Symposium on Geo-information for Disaster Management*, 883-899.
- LÖWNER, M.-O., GRÖGER, G., BENNER, J., BILJECKI, F. & NAGEL, C., 2016: Proposal for a New LOD and Multi-representation Concept for CityGML. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **IV(2/W1)**, 3-12.
- LUEBKE, D., 1997: A Survey of Polygonal Simplification Algorithms. *UNC Chapel Hill Computer Science Technical Report*, **TR97-045**.
- MÄNTYLÄ, M., 1988: *An Introduction to Solid Modeling*. Computer Science Press, Rockville, Maryland.
- RONFARD, R. & ROSSIGNAC, J., 1996: Full-range Approximation of Triangulated Polyhedra. *Computer Graphics Forum*, **15**, 67-76.
- ROSSIGNAC, J. & BORREL, P., 1993: Multi-resolution 3D Approximations for Rendering. *Modeling in Computer Graphics*, 455-465.
- SCHAEFFER, S.-E., 2007: Graph Clustering. *Computer Science Review*, **I**, 27-64.
- STOTER, J., VOSSELMANN, G., GOSS, J., ZLATANOVA, S., VERBREE, E., KLOOSTER, R. & REUVERS, M., 2011: Towards a National 3D Spatial Data Infrastructure: Case of the Netherlands. *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation*, 405-420.
- VAN OOSTEROM, P., 2005: Variable-scale Topological Data Structure Suitable for Progressive Data Transfer: The GAP-face Tree and GAP-edge Forest. *Cartography and Geographic Information Science*, **32(4)**, 331-346.