

Lena Albert

Entwicklung von Gütekriterien für die  
Gebäudegeneralisierung  
und deren Anwendung in einem  
Optimierungsansatz

Betreuer: Dipl.-Ing. Jan-Henrik Hauert  
Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Monika Sester



## **Entwicklung von Gütekriterien für die Gebäudegeneralisierung und deren Anwendung in einem Optimierungsansatz**

### Einführung und Ziel der Arbeit

Die Generalisierung befasst sich im Allgemeinen mit der Gewinnung von weniger detaillierten und höher abstrahierten Daten aus einem gegebenen räumlichen Datensatz. Oft kommen dabei Optimierungsverfahren zum Einsatz. Diese Arbeit baut auf einem Optimierungsansatz für die Gebäudevereinfachung auf, der am ikg entwickelt wurde. Grundsätzlich beruht dieser Ansatz darauf, ein Gebäudegrundriss auf eine Teilfolge seiner Kanten zu reduzieren; die selektierten Kanten können verlängert oder verkürzt werden, um ein geschlossenes Polygon zu generieren. Ein so definiertes Polygon muss bestimmte Nebenbedingungen erfüllen, insbesondere darf es keine Selbstschnitte aufweisen, geometrische Abweichungen vom ursprünglichen Grundriss dürfen ein Toleranzmaß nicht überschreiten. In der bestehenden Implementierung liefert das Verfahren die zulässige Kantenfolge mit minimaler Anzahl an Kanten. Es konnte bewiesen werden, dass dieses Optimierungsproblem NP-schwer ist, dieses motivierte eine Lösung durch gemischt-ganzzahlige lineare Programmierung.

Die Minimierung der Kantenanzahl lässt sich damit begründen, dass sie die größtmögliche Datenreduktion verspricht. In der Generalisierung sind allerdings weitere Kriterien zu berücksichtigen, z.B. sollten charakteristische Formen und Flächeninhalte erhalten bleiben. Das Ziel dieser Arbeit ist es, geeignete Qualitätsmaße zu finden und den bestehenden Optimierungsansatz in Hinblick auf diese Kriterien zu erweitern.

### Aufgaben und zeitlicher Ablauf

1. Einarbeitung in den bestehenden Generalisierungsansatz, die angewandten Verfahren zur kombinatorischen Optimierung und die vorliegende Implementierung in Java
2. Entwicklung von Qualitätsmaßen für die Gebäudegeneralisierung
3. Umsetzung im Optimierungsansatz und Erweiterung der Software
4. Tests und Beurteilung des Verfahrens anhand von Beispielen

(Dipl.-Ing. Jan-Henrik Haurert)



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1	Mathematische Programme zur Optimierung . . . . .	5
2.2	Verfahren zur Gebäudevereinfachung nach Haurert & Wolff (2008) . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Erweiterung des Verfahrens nach Haurert &amp; Wolff (2008)</b>	<b>13</b>
3.1	Limitation des bestehenden Verfahrens . . . . .	13
3.2	Aufstellung von Kostenfunktionen . . . . .	16
3.2.1	Erstes Kriterium: Kantenlänge . . . . .	17
3.2.2	Zweites Kriterium: Rechtwinkligkeit . . . . .	19
3.2.3	Drittes Kriterium: Flächenänderung . . . . .	20
3.2.4	Bestimmung der Gesamtkosten . . . . .	22
<b>4</b>	<b>Analyse der Kostenfunktionen</b>	<b>23</b>
4.1	Analyse der einzelnen Kostenfunktionen . . . . .	23
4.2	Analyse der kombinierten Kostenfunktionen . . . . .	31
4.3	Auswertung eines größeren Testgebietes . . . . .	35
4.4	Probleme . . . . .	38
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>40</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>41</b>
	<b>CD mit Programmcode</b>	<b>43</b>

# Kapitel 1

## Einführung

Die Generalisierung beschreibt die Vorgänge bei der kartographischen Modellierung von Geo-Daten, bei denen themen- oder darstellungsbedingt unwesentliche Merkmale vernachlässigt werden und wesentliche Merkmale erhalten bleiben oder in übergeordnete Merkmale überführt werden. Dies geschieht in Abhängigkeit von dem geforderten Grad der Abstraktion. Das Ziel der Generalisierung ist die Erstellung einer Karte, welche die Anforderungen eines kleineren Maßstabs erfüllt (Minimaldimensionen) und die charakteristischen Eigenschaften der Ursprungskarte bewahrt. Diese Karte soll so genau und vollständig wie nötig und so anschaulich und aussagekräftig wie möglich sein. In der modernen (digitalen) Kartographie wird zwischen der Modellgeneralisierung und der kartographischen Generalisierung unterschieden. Die Modellgeneralisierung erzeugt ein digitales Objektmodell mit einer bestimmten semantischen und geometrischen Auflösung, die für den Zweck des Modells und der Erfassbarkeit der Objekte passend ist. Mit der kartographischen Generalisierung werden die Voraussetzungen für eine effektive Kommunikation geschaffen und Darstellungskonflikte beseitigt. Zu den elementaren Vorgängen der Generalisierung zählen das Vereinfachen, Vergrößern, Verdrängen, Zusammenfassen (Aggregieren), Auswählen (Selektieren), Klassifizieren und Bewerten (Hake *et al.*, 2002).

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Vereinfachung von Gebäudegrundrissen. Um lesbare Karten in einem kleineren Maßstab zu erzeugen und um Datensätze mit einem angemessenen Abstraktionsgrad zu liefern, müssen einige Details einer großmaßstäbigen Gebäudedarstellung vernachlässigt werden. Die Forschung auf dem Gebiet der Automation der Modellgeneralisierung führte zu einer großen Anzahl unterschiedlicher Generalisierungsalgorithmen.

Ein klassischer Ansatz zur Gebäudevereinfachung basiert auf expliziten Regeln, die sukzessiv auf den jeweiligen Gebäudegrundriss angewendet werden (Staufenbiel, 1973). Ein neuerer Ansatz von Kada & Luo (2006) arbeitet mit den Techniken „half-space-modelling“ und „cell decomposition“ aus dem Bereich der Computergrafik. Hierbei werden alle Kanten des Grundrisses als Primitive betrachtet, die den Raum aufteilen und durch deren Schnitt Zellen entstehen. Um eine Vereinfachung des Grundrisses zu erzielen, wird die Anzahl der Zellen reduziert. Mayer (1998) arbeitet mit morphologischen Operatoren um die Grundrisse von Gebäuden zu vereinfachen. Der Ansatz von Sester (2005) basiert auf einem zweistufigen Verfahren. Im ersten Schritt werden unter Anwendung verschiedener Regeln kleine Strukturen entfernt. Anschließend wird der vereinfachte Grundriss mit Hilfe einer Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate optimal an das Originalgebäude angepasst. Andere Ansätze arbeiten mit Bilderkennungsverfahren um den ursprünglichen Grundriss durch eine passende Standardform zu ersetzen (Meyer, 1989; Rainsford & Mackaness, 2002).

Das Problem der Vereinfachung von Gebäudegrundrissen ähnelt dem Problem der Linienvereinfachung. Allerdings handelt es sich bei den 2-dimensionalen Polygonen um regelmäßige Strukturen, deren charakteristische Eigenschaften berücksichtigt werden müssen. Haurert & Wolff (2008) präsentieren einen neuen Optimierungsansatz zur Vereinfachung von Gebäudegrundrissen, der von einem häufig verwendeten Ansatz zur Linienvereinfachung inspiriert ist. Das Problem mit Hilfe einer Optimierung anzugehen, liegt in zwei Sachverhalten begründet. Zum einen möchte man im Vergleich zu anderen Methoden Ergebnisse höherer Qualität erzielen und zum anderen ist es hierbei möglich verschiedene Optimierungsziele und -bedingungen zu integrieren und zu testen. Somit können Qualitätsmaße für die Generalisierung gefunden werden. Bei dem allgemeinen Ansatz zur Linienvereinfachung wird eine Teilmenge der Linienpunkte ausgewählt. Die vereinfachte Linie gilt als zulässig, wenn die ursprüngliche Linie innerhalb eines  $\varepsilon$ -Puffers um die vereinfachte Linie liegt. In dem Optimierungsansatz von Deveau (1985) wird die Anzahl der Linienpunkte in Abhängigkeit von der oben genannten Bedingung reduziert. Campbell & Cromley (1991) beschreiben ein allgemeines Modell, in dem die Linienvereinfachung als „kürzestes-Wege“-Problem formuliert wird. Es erlaubt die Einbindung unterschiedlicher Optimierungsziele in Abhängigkeit von verschiedenen Bedingungen. Weitere Arbeiten beschäftigen sich diesbezüglich z.B. mit dem Erhalt von Winkeln (Chen *et al.*, 2005), Abständen (Gudmundsson *et al.*, 2007), Flächen (Bose *et al.*, 2006) und topologischen Beziehungen (de Berg *et al.*, 1998).

Das Verfahren nach Haurert & Wolff (2008) unterscheidet sich grundsätzlich

von den Ansätzen zur Linienvereinfachung darin, dass eine Linie nicht auf eine Teilmenge der Punkte reduziert wird, sondern auf eine Teilmenge der Kanten. Somit definiert eine Teilmenge der Kanten des Originalgebäudes den vereinfachten Grundriss. Bei dem Verfahren entstehen neue Eckpunkte an den Schnittpunkten aufeinander folgender Kanten der Teilmenge. Bei diesem Ansatz werden die Richtungen der Kanten nicht verändert und bewahren somit die Struktur des ursprünglichen Gebäudes. Das Optimierungsziel ist die Minimierung der Kanten in Abhängigkeit von einem gegebenen Toleranzwert  $\varepsilon$ .

Die Minimierung der Kantenanzahl ist sinnvoll, um die Datenmenge zu reduzieren, z.B. für die Komprimierung von Vektordaten. Bei der Generalisierung sind allerdings weitere Ziele zu definieren, um charakteristische Merkmale zu bewahren. Diese Arbeit befasst sich mit der Definition einer geeigneten Zielfunktion. Es werden also angemessene Optimierungskriterien bzw. Bedingungen definiert, um die Ziele der Generalisierung großmaßstäbiger Gebäudedarstellungen besser umzusetzen, d.h. charakteristische Eigenschaften der Gebäude zu erhalten (u.a. Parallelität, Rechtwinkligkeit). Gebäude können dank dieser Charakteristika zum Beispiel auch auf kleinen Displays relativ einfach und eindeutig als solche erkannt werden. Mit dem zunehmenden Einsatz mobiler Geräte mit kleinen Displays (z.B. Handys, PDAs und GPS-Navigationssysteme) steigt auch der Bedarf an angemessener Transformation und Visualisierung von Gebäudedaten. Im Generalisierungsprozess soll die Lesbarkeit verbessert und die Form und Größe des ursprünglichen Gebäudes bewahrt werden.

Zunächst beschäftigt sich die Arbeit im 2. Kapitel mit den Grundlagen. An dieser Stelle werden im ersten Teil (Kapitel 2.1) die Grundlagen der linearen und ganzzahlig linearen Programmierung vorgestellt, mit deren Hilfe das Optimierungsproblem formuliert und gelöst werden kann. Der zweite Teil (Kapitel 2.2) beschreibt das bereits bekannte Verfahren zur Gebäudevereinfachung nach Haurert & Wolff (2008), welches die Basis für die Einbindung weiterer Optimierungsziele darstellt. Kapitel 3.1 motiviert zunächst anhand problembehafteter Beispiele die Aufstellung verschiedener Kostenfunktionen. Im Anschluss an die Definition angemessener Kriterien in Kapitel 3.2 soll der Vergleich der Ergebnisse in Kapitel 4 zeigen, mit welchen Kriterien ein gut generalisiertes Gebäude erzielt werden kann. Mit dieser Information können Aussagen über die Qualität der Generalisierung getroffen werden, die in der Literatur als wichtiger Aspekt beschrieben wird (Bard, 2004).



# Kapitel 2

## Grundlagen

### 2.1 Mathematische Programme zur Optimierung

Bei einem Optimierungsproblem ist die Menge der zulässigen Lösungen in der Regel implizit durch Nebenbedingungen definiert und die optimale Lösung ergibt sich durch die Optimierung einer Zielfunktion über dieser Lösungsmenge.

In einem **linearen Programm (LP)** sind eine  $m \times n$  Matrix  $A$ , ein Vektor  $b$  der Dimension  $m \times 1$  und ein Vektor  $c$  der Dimension  $n \times 1$  gegeben. Das Ziel ist es, einen Vektor  $x \in \mathbb{R}^n$  zu finden, der das Skalarprodukt

$$c^T \cdot x$$

minimiert und die linearen Bedingungen

$$Ax \geq b, x \geq 0$$

erfüllt.

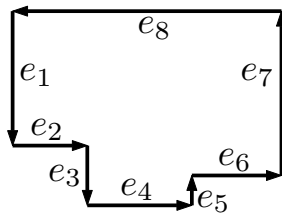
Es existieren unterschiedliche Methoden zur Lösung eines LPs. Die zwei gebräuchlichsten Methoden sind das Simplex-Verfahren und das Innere-Punkte-Verfahren. Beide Verfahren betrachten stufenweise sich verbessernde Lösungen, bis die optimale Lösung gefunden ist. Der Simplex-Algorithmus kann theoretisch exponentielle Zeit benötigen, löst aber in der Praxis LPs mit mehreren Tausend Variablen in relativ kurzer Zeit, unter der Voraussetzung einer dünnbesetzten Matrix  $A$ . Das Innere-Punkte-Verfahren löst große Probleme

mit einer dünnbesetzten Matrix  $A$  häufig schneller als das Simplex-Verfahren, arbeitet aber nach dem Hinzufügen weiterer Bedingungen oder Variablen im LP nicht so effizient wie das Simplex-Verfahren (Jarre & Stoer, 2004).

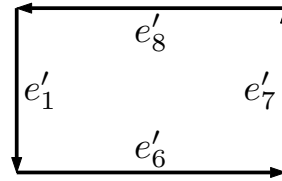
Der Lösungsraum eines LPs lässt sich geometrisch als Polyeder interpretieren. Die  $i$ -te Zeile eines linearen Programms ist eine einschränkende Ungleichung der Form  $a_i x \geq b_i$ . Die Menge  $\{x | a_i x = b_i\}$  beschreibt eine Hyperebene im  $n$ -dimensionalen Raum. Die Menge aller zulässigen Punkte, welche die Ungleichung erfüllen, befinden sich somit in einem Halbraum. Der Schnitt dieser Halbräume ergibt für alle Ungleichungen die zulässigen Lösungen und bildet ein  $n$ -dimensionales Polyeder. Ziel der Optimierung ist es, den Punkt aus der zulässigen Lösungsmenge zu finden, der die lineare Funktion  $c^T \cdot x$  minimiert. Das heißt in der Theorie könnte man geometrisch die Hyperebene  $\{x | c^T \cdot x = 0\}$  solange entgegen der Richtung des Vektors  $c$  verschieben bis diese Ebene das Polyeder gerade noch berührt. Die Menge aller Berührungspunkte ist die optimale Lösung des linearen Programms.

Bei einem **linearen ganzzahligen Programm** (engl. integer (linear) program: **ILP**, **IP**) ersetzt man die reellen Variablen  $x \in \mathbb{R}^n$  durch ganzzahlige Variablen  $x \in \mathbb{Z}^n$ . Mit IPs können auch solche Probleme beschrieben werden, die mit LPs schwer ausdrückbar sind. Obwohl die Definitionen von einem IP und einem LP sehr ähnlich sind, ist die Komplexität zur Lösung eines IPs deutlich höher. LPs können in polynomieller Zeit, also effizient, gelöst werden, wo hingegen die Lösung eines IPs NP-schwer ist. In der theoretischen Informatik dient der Begriff NP-schwer (engl. NP-hard) zur Klassifizierung von Problemen hinsichtlich ihrer Komplexität. Ein NP-schweres Problem ist mindestens genauso komplex wie jedes Problem der Klasse NP (Non-deterministic Polynomial-time). Bis heute konnte kein effizienter Algorithmus für ein NP-schweres Problem gefunden werden. Die effiziente Lösung eines NP-schweren Problems würde auch die effiziente Lösung aller Probleme der Klasse NP ermöglichen. Trotz der NP-Schwere der Integer Programmierung existieren viele Algorithmen zur Lösung von IPs, die sich in der Praxis für verschiedene Anwendungen als geeignet herausgestellt haben. Zur Lösung der IPs wird in dieser Arbeit das freie Optimierungsprogramm *lp\_solve* verwendet.

Ein **gemischt ganzzahliges Programm** (engl. mixed integer program: **MIP**) ist eine Kombination aus LP und IP und kann sowohl reelle als auch ganzzahlige Variablen enthalten. Ein MIP lässt sich mit den Lösungsverfahren für IPs lösen. Binäre IPs beschränken ihre ganzzahligen Variablen auf die Werte 0 und 1. Diese Variablen repräsentieren Entscheidungen („ja“ oder „nein“).



(a) Originalgrundriss



(b) Ergebnis bei Verwendung des shortcuts  $(e_1, e_6)$

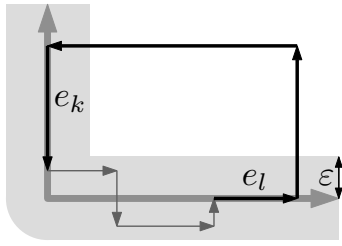
Abbildung 2.1: Vereinfachung eines Grundrisses mit shortcuts.

Die lineare und ganzzahlige Programmierung hat sich als sehr nützlich zur Lösung vieler unterschiedlicher Probleme herausgestellt, z.B. im Bereich der Planung von Verkehrs- und Telekommunikationsnetzen oder in der Produktionsplanung.

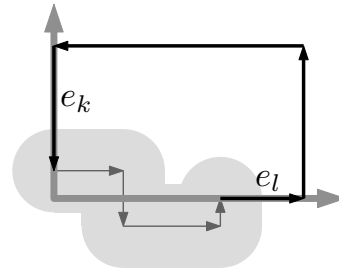
## 2.2 Verfahren zur Gebäudevereinfachung nach Haurert & Wolff (2008)

Haurert & Wolff (2008) definieren ein Gebäude als eine im Gegenuhrzeigersinn orientierte Folge von Kanten  $P = (e_1, e_2, \dots, e_n)$ . In Abhängigkeit von einem benutzerdefinierten Toleranzwert  $\varepsilon$  sollen die Kanten ausgewählt werden, welche die wichtigsten Charakteristika des Gebäudes repräsentieren. Das *L-shape* eines Kantenpaares  $(e_k, e_l)$  wird definiert als die Vereinigung von zwei Strahlen. Beide Strahlen beginnen im Schnittpunkt von  $e_k$  und  $e_l$ . Der erste Strahl verläuft in entgegengesetzter Richtung von  $e_k$ . Der zweite Strahl verläuft in Richtung von  $e_l$ . Das L-shape stellt also eine Verbindung zwischen den Kanten  $e_k$  und  $e_l$  her. Diese Verbindung wird zum Teil des neuen Gebäudes, wenn man sich dazu entscheidet, die Kanten  $e_{k+1}, e_{k+2}, \dots, e_{l-1}$  auszulassen. Das Paar  $(e_k, e_l)$  steht somit für eine Abkürzung oder englisch *shortcut*. Ein Paar  $(e_k, e_{k+1})$  wird als trivialer shortcut bezeichnet, da es keine Kanten zwischen  $e_k$  und  $e_{k+1}$  gibt. In der Abbildung 2.1 werden mit dem shortcut  $(e_1, e_6)$  vier Kanten ausgelassen, dennoch bleibt die charakteristische Form des ursprünglichen Gebäudes erhalten.

Ein shortcut wird als zulässig definiert, wenn die ausgelassenen Kanten in einem  $\varepsilon$ -Puffer um das L-shape liegen. Diese Bedingung muss auch im umgekehrten Sinn erfüllt sein. Abbildung 2.2 verdeutlicht diesen Sachverhalt. Der dargestellte shortcut  $(e_k, e_l)$  ist zulässig, da beide Anforderungen erfüllt sind.

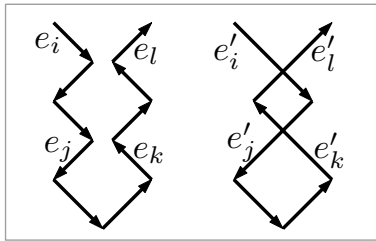


(a) 1. Bedingung ist erfüllt

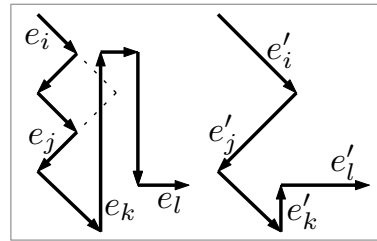


(b) 2. Bedingung ist erfüllt

Abbildung 2.2: Zulässigkeit des shortcuts  $(e_k, e_l)$ .  $\varepsilon$ -Puffer werden schattiert dargestellt.



(a) Die gleichzeitige Realisierung der shortcuts führt zu einem Polygon mit Selbstschnitten, obwohl beide shortcuts alleine zulässig sind.



(b) Die gleichzeitige Realisierung der shortcuts führt zu einem Polygon ohne Selbstschnitte, obwohl der shortcut  $(e_i, e_j)$  alleine nicht zulässig ist.

Abbildung 2.3: Zulässigkeit von shortcuts unter dem Gesichtspunkt der Vermeidung von Selbstschnitten.

Jede Vereinfachung des Ausgangspolygons wird als zulässig definiert, wenn zusätzlich noch die Bedingung erfüllt ist, dass in dem resultierenden Polygon keine Selbstschnitte auftreten. Die Abbildung 2.3(a) zeigt zwei zulässige aber zueinander in Konflikt stehende shortcuts. Bei dem resultierenden Polygon würde ein Selbstschnitt entstehen. Allerdings wäre die Vereinfachung zulässig, wenn nur ein shortcut realisiert wird. Abbildung 2.3(b) verdeutlicht den Fall, bei dem die gleichzeitige Anwendung zweier shortcuts zu einem Polygon ohne Selbstschnitte führen kann, obwohl der shortcut  $(e_i, e_j)$  alleine nicht zulässig ist.

Um die Anzahl der Kanten in Abhängigkeit von den genannten Bedingungen zu minimieren, definieren Haurert & Wolff (2008) einen gerichteten Graph  $G(P, S)$  als sogenannten *shortcut graph*. Die Knotenmenge  $P$  enthält alle Kanten des ursprünglichen Gebäudes. Für jeden zulässigen shortcut  $(u, v)$

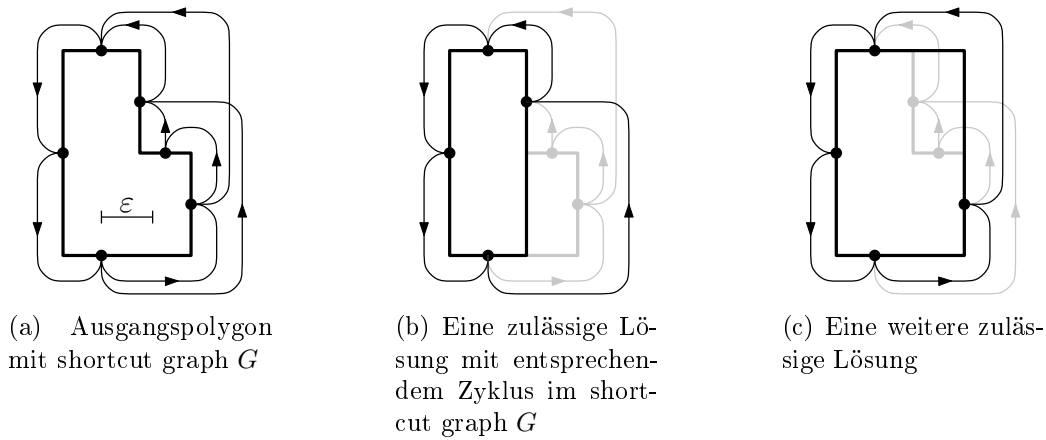


Abbildung 2.4: Ein Gebäude mit zwei zulässigen Vereinfachungen.

enthält die Menge  $S$  eine gerichtete Kante. Abbildung 2.4 zeigt zwei zulässige Lösungen für die Vereinfachung eines Gebäudes. Die ausgewählten Elemente des shortcut graph sind hervorgehoben dargestellt. Jede zulässige Lösung entspricht einem Zyklus im shortcut graph. Nach der grundsätzlichen Idee von Haunert & Wolff (2008) kann die optimale Lösung zur Vereinfachung des Gebäudes in der Menge der Zyklen in  $G$  gefunden werden. Ein nahe liegender Ansatz ist die Suche nach dem kleinsten Zyklus. Allerdings erfüllt der kürzeste Zyklus grundsätzlich nicht alle Bedingungen, z.B. können Selbstschnitte auftreten.

Um weitere Bedingungen zu integrieren werden mit Hilfe ganzzahliger Programmierung die Lösungen zur Vereinfachung eines Grundrisses mit dem Graphen  $G = (P, S)$  formuliert. Es werden binäre Variablen eingeführt:

$$x_s \in \{0, 1\} \quad \text{für jeden shortcut } s \in S$$

mit  $x_s = 1$ , wenn der shortcut  $s \in S$  für das vereinfachte Gebäude ausgewählt wird. Die Anzahl der ausgewählten shortcuts entspricht der zu minimierenden Kantenanzahl. Somit kann die Zielfunktion zur Minimierung der Anzahl der Kanten wie folgt ausgedrückt werden:

$$\text{Minimiere } \sum_{s \in S} x_s \quad (2.1)$$

Die nächste Bedingung soll sicherstellen, dass die selektierten shortcuts  $s$  mit  $x_s = 1$  einen Zyklus im Graphen bilden. Für jede Kante  $e_j \in P$  soll sichergestellt werden, dass es nur einen shortcut gibt der entweder  $e_j$  auslöst

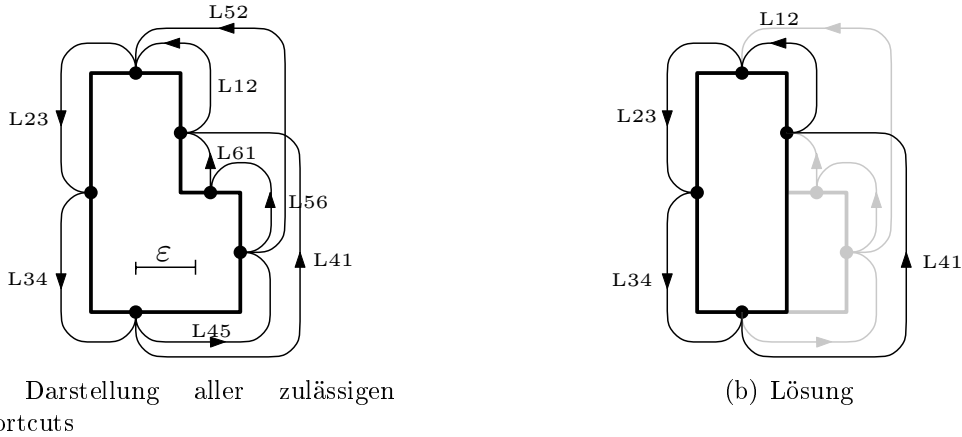


Abbildung 2.5: Auswahl von shortcuts zur Vereinfachung eines Grundrisses.

oder mit der Kante  $e_j$  beginnt.

$$\sum_{s \in \{(e_i, e_k) \in S \mid i \leq j < k\}} x_s = 1 \quad \text{für alle } e_j \in P \quad (2.2)$$

Um zu vermeiden, dass sich Kanten im vereinfachten Gebäude schneiden, werden weitere Bedingungen aufgestellt. Die erste Bedingung soll sicherstellen, dass zwei zueinander in Konflikt stehende shortcuts nicht gleichzeitig verwendet werden, weil das zu einem Selbstschnitt führen würde (siehe Abbildung 2.3(a)).

$$x_s + x_t \leq 1 \quad \text{für alle in Konflikt stehenden shortcuts } s, t \in S. \quad (2.3)$$

Die zweite Bedingung behandelt den Fall, dass der shortcut  $s$  bei alleiniger Realisierung zu einem Selbstschnitt mit einer Kante  $e$  des Ausgangspolygons führen würde. Der shortcut  $s$  kann somit nur in Verbindung mit einem anderen shortcut ausgewählt werden, der die Kante  $e$  auslöst oder zumindest ausreichend kürzt (siehe Abbildung 2.3(b)).

$$\sum_{t \in (S_{s,e} \subset S)} x_t \geq x_s \quad \begin{array}{l} \text{für alle Paare } (s, e) \in S \times P \\ \text{mit dem shortcut } s \text{ im Konflikt zur Kante } e. \end{array} \quad (2.4)$$

Das Verfahren der Gebäudevereinfachung nach Haurert & Wolff (2008) wurde als Java Anwendung implementiert. Dieses Programm erzeugt eine Datei, in der neben der Zielfunktion auch die Nebenbedingungen als IP-Formulierungen enthalten sind. Solch eine Datei ist wie *Beispiel.lp* für das Gebäude

aus Abbildung 2.5(a) aufgebaut. Hierbei beschreibt der Abschnitt *Minimize* die Zielfunktion (2.1). Der Abschnitt *Subject To* beinhaltet die Nebenbedingungen (2.2),(2.3) und (2.4). In diesem Fall liegen allerdings nur Nebenbedingungen der Art (2.2) vor. Die Variablen, d.h. alle zulässigen shortcuts, werden unter *Binaries* aufgelistet.

```

Beispiel.lp:
Minimize
  + 1.0 L_1_2 + 1.0 L_2_3 + 1.0 L_3_4 + 1.0 L_4_1
+ 1.0 L_4_5 + 1.0 L_5_2 + 1.0 L_5_6 + 1.0 L_6_1
Subject To
  + L_1_2 + L_5_2 = 1
  + L_2_3 = 1
  + L_3_4 = 1
  + L_4_1 + L_4_5 = 1
  + L_4_1 + L_5_2 + L_5_6 = 1
  + L_4_1 + L_5_2 + L_6_1 = 1
Binaries
L_1_2
L_2_3
L_3_4
L_4_1
L_4_5
L_5_2
L_5_6
L_6_1
End

```

Im Anschluss wird das freie Optimierungsprogramm *lp\_solve* gestartet, das die optimale Lösung ermittelt und in eine Datei schreibt. Diese Datei liefert die Vorlage zur Konstruktion des vereinfachten Gebäudes. Für das Gebäude aus Abbildung 2.5(a) wird die Datei *Beispiel.mst* erzeugt. Die für das vereinfachte Gebäude erzielten Kosten gibt der Wert *Value of objective function* an. Aufgrund der Vereinfachung, dass für alle L-Shapes einheitliche Kosten vom Wert 1.0 gelten, stellt dieser Kostenwert auch die Anzahl der shortcuts bzw. Kanten im vereinfachten Grundriss dar. Die optimale Lösung des IPs wird unter *Actual values of the variables* aufgelistet. Die ausgewählten shortcuts erhalten den Wert 1.

```
Beispiel.mst:
set_XLI: Successfully loaded 'xli_CPLEX'
Value of objective function: 4
Actual values of the variables:
L_1_2          1
L_2_3          1
L_3_4          1
L_4_1          1
L_4_5          0
L_5_2          0
L_5_6          0
L_6_1          0
```



# Kapitel 3

## Erweiterung des Verfahrens nach Haunert & Wolff (2008)

### 3.1 Limitation des bestehenden Verfahrens

Nach dem Modell von Haunert & Wolff (2008) werden für alle shortcuts einheitliche Kosten veranschlagt. Für den Zweck der Datenkompression erscheint diese Festlegung sinnvoll. Allerdings handelt es sich hierbei nicht um das wichtigste Ziel bei der Generalisierung von Karten. Um die Ziele der Gebäudegeneralisierung besser umzusetzen, bietet es sich an, unterschiedliche Kosten für shortcuts zu definieren. Die Kanten im gerichteten Graph mit den höheren Kosten stellen dann die Vereinfachungen dar, die im Sinne der Generalisierungsziele weniger gut geeignet sind. Mit dieser Festlegung ist eine sinnvollere Auswahl von shortcuts möglich. Dieser Aspekt lässt sich anhand von drei Beispielen motivieren, bei denen das Verfahren mit einheitlichen Kosten ungeeignete Vereinfachungen erzielt. Im Folgenden wird für jedes Beispiel der Originalgrundriss und das problembehaftete Ergebnis dargestellt. Die ausgewählten Kanten für den vereinfachten Grundriss sind als schwarze Pfeile im Originalgrundriss gekennzeichnet.

Abbildung 3.1 zeigt die problembehaftete Vereinfachung eines Gebäudes. Das Originalgebäude besitzt im Grunde einen quadratischen Grundriss mit kleinen Einbuchtungen an den Ecken. Die kurzen Kanten, die diese Einbuchtungen erzeugen, stehen allerdings nicht in einem rechten Winkel zueinander. Mit dem Verfahren nach Haunert & Wolff (2008) werden an zwei Stellen diese kurzen Kanten als shortcut bildende Kanten ausgewählt. Das hat zur Folge, dass der vereinfachte Grundriss nicht mehr eine quadratische Form besitzt,

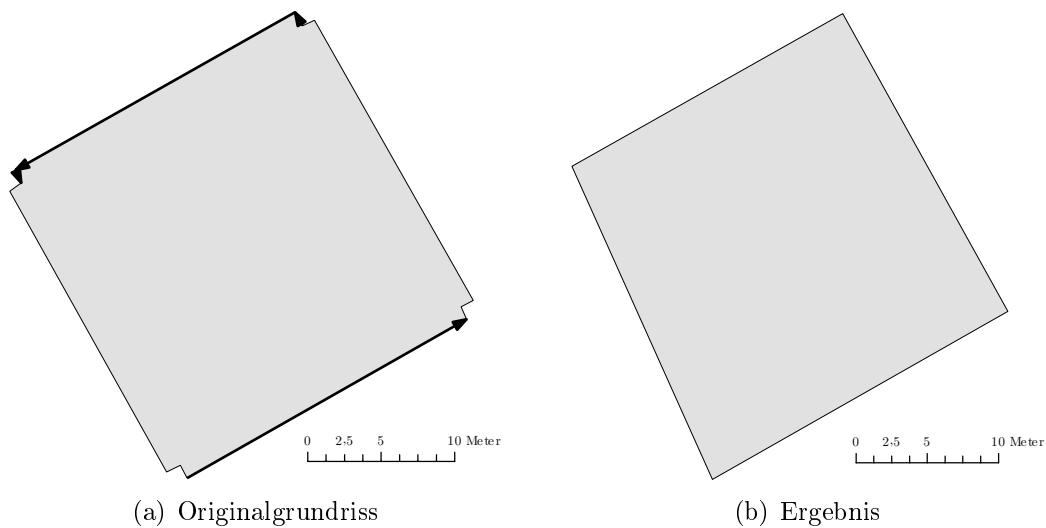


Abbildung 3.1: Vereinfachung eines einfachen, quadratischen Gebäudes mit  $\varepsilon = 2,5$  m.

sondern an einer Stelle die Kanten in einem spitzen Winkel aufeinander treffen. Der vereinfachte Grundriss setzt sich aus Kanten zusammen, die nicht das charakteristische, quadratische Erscheinungsbild des Originalgrundrisses repräsentieren. Um eine sinnvollere Auswahl der shortcuts zu ermöglichen, wäre eine Bestrafung von shortcuts, die aus kurzen Kanten gebildet werden und gleichzeitig lange Strecken neu einfügen, oder deren Kanten nicht in einem rechten Winkel zueinander stehen, denkbar. Außerdem wäre die Einführung von hohen Kosten für shortcuts, die eine große Flächenänderung bewirken, vorstellbar.

Ein weiteres Beispiel, bei dem die Vereinfachung nach dem oben beschriebenen Verfahren problembehaftete Ergebnisse erzielt, zeigt Abbildung 3.2. Der dargestellte Grundriss der Kirche besteht aus vielen kurzen Kanten. Zur Vereinfachung des Grundrisses werden mit dem Optimierungsansatz nach Haurert & Wolff (2008) zum Teil sehr kurze Kanten ausgewählt. Hierbei unterscheidet die Methode nicht zwischen wichtigen und unwichtigen Kanten. Um wichtige und charakteristische Formen des Originalgebäudes zu erhalten, bietet es sich in diesem Fall an, hohe Kosten für die Auswahl kurzer und unwichtiger Kanten einzuführen. Die Bestrafung spitzer Winkel mit hohen Kosten wäre alternativ oder ergänzend vorstellbar.

Das dritte problembehaftete Beispiel wird in Abbildung 3.3 dargestellt. Hierbei handelt es sich um ein größeres Bürogebäude. Die Vereinfachung des Grundrisses erzeugt an einer Stelle unbefriedigende Ergebnisse. Im unteren

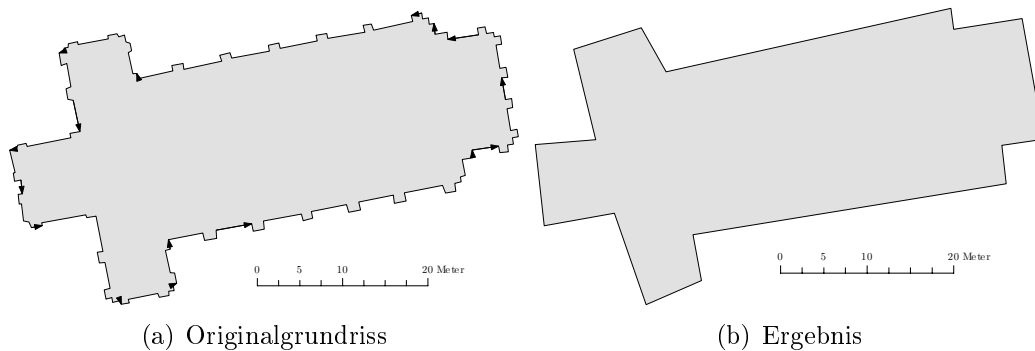


Abbildung 3.2: Vereinfachung einer Kirche mit  $\varepsilon = 2,5$  m.

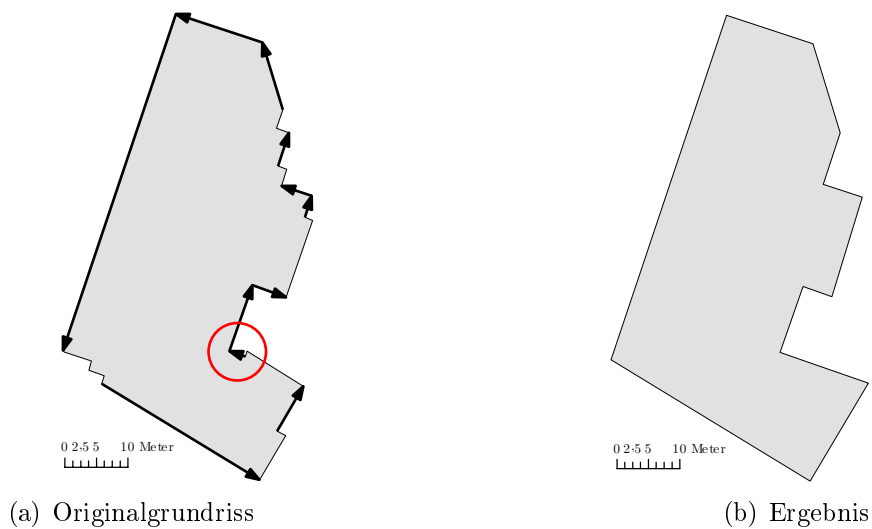


Abbildung 3.3: Vereinfachung eines winkligen Gebäudes mit  $\varepsilon = 2,5$  m.

Teil des Gebäudes wird eine kleine, unwichtige Kante für einen shortcut ausgewählt (in Abbildung 3.3(a) rot eingekreist) und daraus resultierend ist die dominierend parallele, charakteristische Form des Gebäudes nicht mehr erkennbar. Um die Parallelität an dieser Stelle zu erhalten, bietet es sich auch in diesem Fall an, die Verwendung kurzer, unwichtiger Kanten für shortcuts zu bestrafen oder shortcuts, die eine große Flächenänderung zur Folge haben, mit hohen Kosten zu versehen. Die Definition höherer Kosten für shortcuts mit spitzen Winkeln würde in diesem Fall keine befriedigenden Ergebnisse liefern, da es sich um ein nicht-rechtwinkliges Gebäude handelt.

## 3.2 Aufstellung von Kostenfunktionen

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Aufstellung von geeigneten Kostenfunktionen für shortcuts, um bessere Generalisierungsergebnisse zu erzielen.

Die bisherige Zielfunktion minimiert die Anzahl der shortcuts, die mit der Anzahl der Kanten im vereinfachten Gebäude gleichzusetzen ist. Um im Falle mehrerer zulässiger Lösungen die optimale Lösung zu ermitteln, bietet es sich an, eine zweite Komponente in die Zielfunktion zu integrieren. Mit der Funktion  $c : S \rightarrow \mathbb{R}_0^+$  wird für jeden shortcut  $s \in S$  ein zusätzlicher Kostenterm bestimmt. Das Optimierungskriterium ist wie folgt definiert:

$$\text{Minimiere } \sum_{s \in S} (M + c(s)) x_s \quad (3.1)$$

unter den Nebenbedingungen (2.2),(2.3) und (2.4).

$M$  stellt hierbei eine beliebig große Konstante dar, die allerdings groß genug sein muss, damit das Minimierungskriterium berücksichtigt wird. Je größer die Konstante  $M$  gewählt wird, desto stärker geht das Minimierungskriterium in die Zielfunktion ein. Die optimale Lösung sollte eine möglichst kleine Anzahl von shortcuts enthalten. Allerdings ist in einigen Fällen die Auswahl von mehr als der minimalen Anzahl von Kanten sinnvoll, um die charakteristischen Eigenschaften des Gebäudes besser zu repräsentieren. Die Kostenfunktion  $c(s)$  ermittelt für jeden shortcut  $s$  die entsprechenden Kosten. Folglich besitzen die shortcuts keine einheitlichen Kosten. Aus allen möglichen Lösungen wird die Vereinfachung mit den niedrigsten Gesamtkosten als optimale Lösung ausgewählt.

Anhand der problembehafteten Beispiele aus Kapitel 3.1 hat sich herauskristallisiert, dass die Integration von zusätzlichen Kosten möglicherweise bessere Ergebnisse liefert. Im Hinblick auf die Erstellung eines gut generalisierten Gebäudes, d.h. die Bewahrung der charakteristischen Merkmale der Gebäude, haben sich folgende Kriterien bei der Betrachtung der Beispiele als besonders geeignet herausgestellt.

- Das vereinfachte Gebäude sollte möglichst durch eine rechtwinklige Form beschrieben werden, damit es in einem kleinen Maßstab eindeutig identifiziert werden kann.
- Der vereinfachte Grundriss sollte zu einem möglichst großen Teil aus den ursprünglichen Gebäudekanten bestehen.
- Die Gesamtfläche des vereinfachten Gebäudes sollte sich im Vergleich zu der Originalfläche nur wenig ändern.

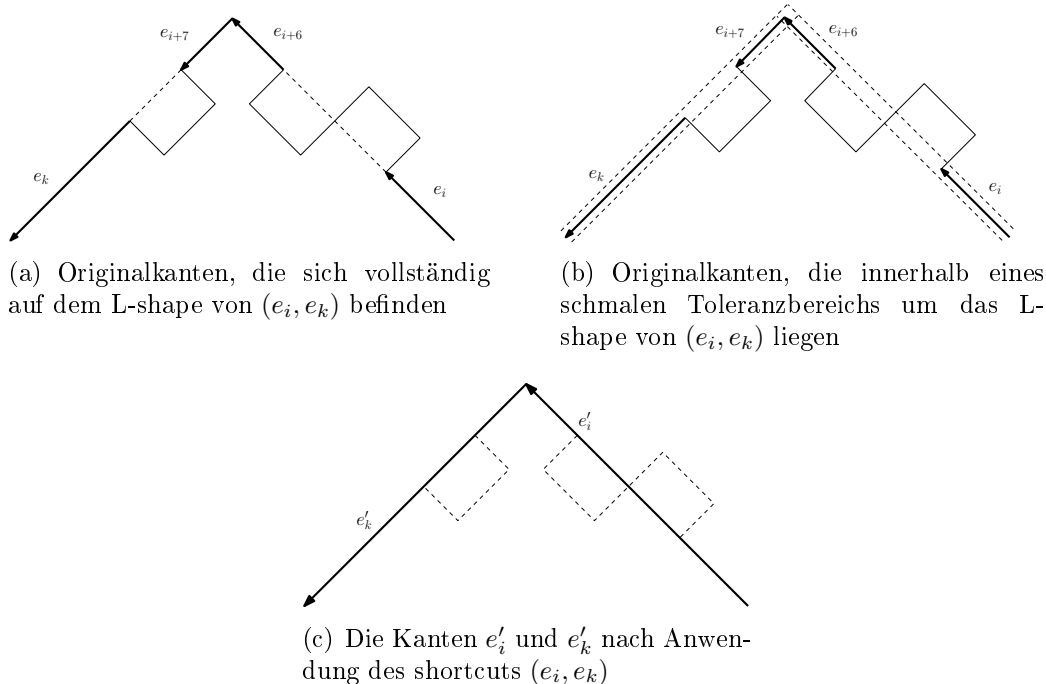


Abbildung 3.4: Anteil der Originalkanten an der Gesamtlänge der neuen Gebäudeecke.

Im Folgenden werden drei unterschiedliche Kostenfunktionen für einen shortcut  $(e_i, e_k) \in S$  des gerichteten Graphen  $G = (P, S)$  (definiert in Kapitel 2.2) aufgestellt. Das Kantenpaar  $(e'_i, e'_k)$  beschreibt an Stelle der ursprünglichen Kanten  $e_i, e_{i+1}, \dots, e_k$  die neue Gebäudeecke des vereinfachten Gebäudes nach Anwendung des shortcuts  $(e_i, e_k)$ .

### 3.2.1 Erstes Kriterium: Kantenlänge

Die neu entstehenden Gebäudeecken des vereinfachten Grundrisses sollen zu einem großen Teil aus Originalkanten bestehen, damit sichergestellt wird, dass die charakteristische Gebäudeform erhalten bleibt. Bei der Auswahl kurzer Kanten, die dazu führen, dass lange Strecken mit neuen Kanten überbrückt werden müssen, kann es zu deutlichen Abweichungen des vereinfachten Grundrisses von der Originalform kommen (z.B. siehe Abbildung 3.1).

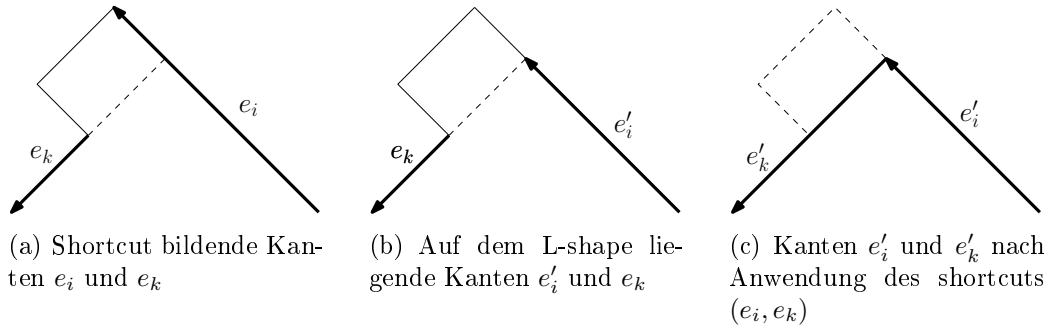


Abbildung 3.5: Verkürzung der shortcut bildenden Kante  $e_i$  bei Realisierung des shortcuts  $(e_i, e_k)$ .

Wir führen zunächst die Funktion  $l : S \rightarrow \mathbb{R}_0^+$  ein, die wie folgt definiert ist:

$$l(e_i, e_k) = \sum_{j=i}^k \lambda_{i,k}(e_j),$$

wobei  $\lambda_{i,k}(e_j)$  die Länge des Anteils von Kante  $e_j$  bezeichnet, der sich im L-shape von  $(e_i, e_k)$  befindet. In Abbildung 3.4(a) befinden sich beispielsweise die vier Kanten  $e_i$ ,  $e_{i+6}$ ,  $e_{i+7}$  und  $e_k$  vollständig im L-shape von  $(e_i, e_k)$ . Folglich entspricht  $l(e_i, e_k)$  der Summe der Längen dieser vier Kanten. Um kleine geometrische Abweichungen zu vernachlässigen, zählen wir hier auch Kanten mit, die nicht genau auf dem L-shape liegen. Es wird ein zusätzlicher Toleranzwert eingeführt, der die Breite des Toleranzbereiches um das L-shape festlegt. Die Kante  $e_{i+6}$  liegt zum Beispiel in Abbildung 3.4(b) nicht direkt auf der Verlängerung von  $e_i$ , aber innerhalb einer geringen Entfernung vom L-shape. Für diesen Fall entspricht  $l(e_i, e_k)$  ebenfalls der Summe der vier Kantenlängen.

In Abbildung 3.5 wird bei Anwendung des shortcuts  $(e_i, e_k)$  die Kante  $e_i$  verkürzt. Mit  $\lambda_{i,k}(e_j)$  fließen ausschließlich die Anteile der Kanten  $e_j$  in die Berechnung ein, die sich im L-shape von  $(e_i, e_k)$  befinden. Bezüglich der Abbildung 3.5 bedeutet dies, dass nur der Anteil der Kante  $e_i$  in die Berechnung von  $l(e_i, e_k)$  einfließt, der innerhalb des L-shapes von  $(e_i, e_k)$  liegt. Das entspricht in diesem Fall, der Länge der Kante  $e'_i$ . Folglich berechnet sich die Länge  $l(e_i, e_k)$  als Summe der Kantenlängen  $|e'_i|$  und  $|e_k|$ .

Als zweites definieren wir die Funktion  $l' : S \rightarrow \mathbb{R}_0^+$ , mit

$$l'(e_i, e_k) = |e'_i| + |e'_k|,$$

wobei  $e'_i$  und  $e'_k$  die neuen Kanten im Gebäudegrundriss sind, die man durch Anwendung des shortcuts  $(e_i, e_k)$  erhält.

Die Kosten berechnen sich nun wie folgt:

$$c_{Kante} = 1 - \frac{l(e_i, e_k)}{l'(e_i, e_k)} \quad \text{mit } c_{Kante} \in [0, 1]. \quad (3.2)$$

Die Funktion  $l(e_i, e_k)$  bestimmt die Länge der ursprünglichen Kanten auf dem L-shape. Mit der Funktion  $l'(e_i, e_k)$  wird die Länge der Kanten, die sich nach der Vereinfachung auf dem L-shape befinden, bestimmt. Den prozentualen Anteil der ursprünglichen Kanten an der Gesamtlänge der neuen Gebäudeecke erhält man durch Division der zwei Funktionen. Folglich beschreiben die Kosten, den Anteil der neu eingefügten Kanten an der Gesamtlänge der neuen Gebäudeecke.

Falls eine ursprüngliche Gebäudecke nicht vereinfacht wird, liefert die Kostenfunktion  $c_{Kante}$  für diesen shortcut den geringsten Kostenwert Null. Die ursprünglichen Kanten beschreiben hierbei die neue Gebäudecke und es werden keine neuen Kanten eingefügt. Die höchsten Kosten entstehen bei shortcuts, die aus kurzen Kanten gebildet werden und lange Strecken neu einfügen.

### 3.2.2 Zweites Kriterium: Rechtwinkligkeit

Eine grundlegende charakteristische Eigenschaft von Gebäuden ist die Rechtwinkligkeit, die auch im Rahmen der Generalisierung bewahrt werden sollte. Die Auswahl von shortcuts, die einen rechten Winkel einschließen, bietet sich daher an. Die Berechnung der Kosten für die shortcuts ist nachfolgend dargestellt. Abbildung 3.6 verdeutlicht die Vorgehensweise für die beiden Fälle  $0 < \varphi \leq \pi/2$  und  $\pi/2 < \varphi \leq \pi$ .

Zunächst wird der Zwischenwinkel  $\varphi$  der Kanten  $e_i$  und  $e_k$  bestimmt.

$$\varphi = \arccos \frac{e_i \cdot e_k}{|e_i| \cdot |e_k|} \quad \text{mit } \varphi \in [0, \pi] \quad (3.3)$$

Im Anschluss wird die Abweichung  $\alpha$  von einem rechten Winkel berechnet, indem man von dem rechten Winkel  $\pi/2$  den Zwischenwinkel  $\varphi$  subtrahiert. Für den Fall, dass  $\pi/2 < \varphi \leq \pi$ , muss der Betrag des Ergebnisses genommen werden.

$$\alpha = |\pi/2 - \varphi| \quad \text{mit } \alpha \in [0, \pi/2] \quad (3.4)$$

Die Division des Winkels  $\alpha$  durch den Winkel  $\pi/2$  ergibt die prozentuale Abweichung von einem idealen rechten Winkel.

$$c_{Winkel} = \frac{\alpha}{\pi/2} \quad \text{mit } c_{Winkel} \in [0, 1] \quad (3.5)$$

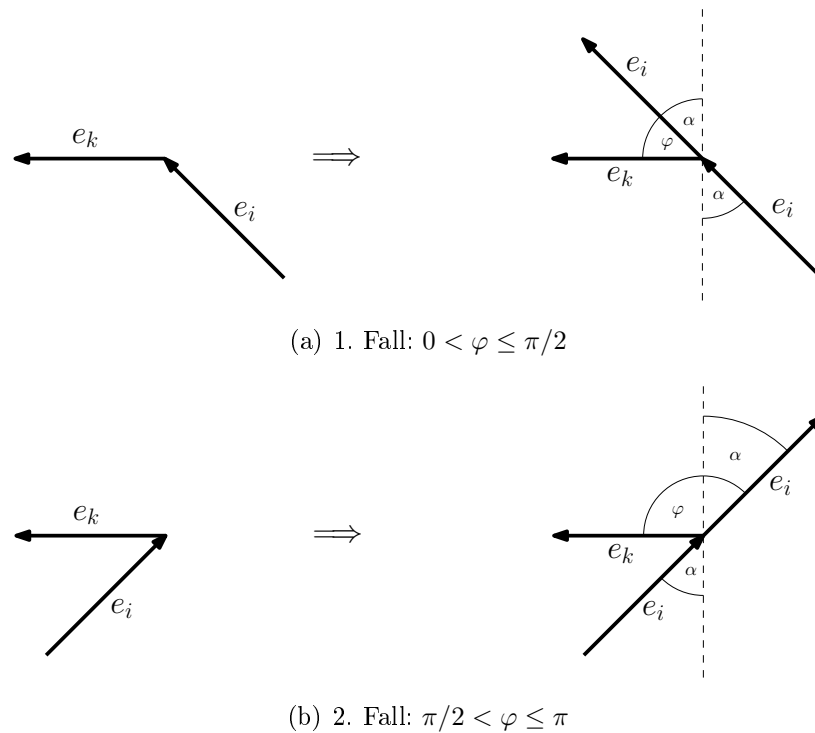


Abbildung 3.6: Bestimmung der Abweichung des shortcuts von einem rechtwinkligen shortcut.

Mit dieser Kostenfunktion werden nahezu rechtwinklige shortcuts gegenüber spitz- oder stumpfwinkligen mit niedrigeren Kosten belohnt. Das heißt die geringsten Kosten vom Wert Null erhalten rechtwinklige shortcuts.

### 3.2.3 Drittes Kriterium: Flächenänderung

Die Gesamtfläche des vereinfachten Gebäudes sollte sich im Vergleich zu der Originalfläche nur wenig ändern. Folglich sollte die Flächenänderung, die ein shortcut verursacht, im Vergleich zu der Originalfläche gering sein. Die Berechnung der Flächenänderung basiert auf der Flächenberechnung nach Gauss über die Polygonpunkte  $((x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n))$ . Der Flächeninhalt des Polygons berechnet sich zu:

$$F = \frac{1}{2} \left| \sum_{i=1}^n x_i (y_{i+1} - y_{i-1}) \right|. \quad (3.6)$$

Der Flächeninhalt  $F_0$  beschreibt die Gebäudefläche vor der Generalisierung



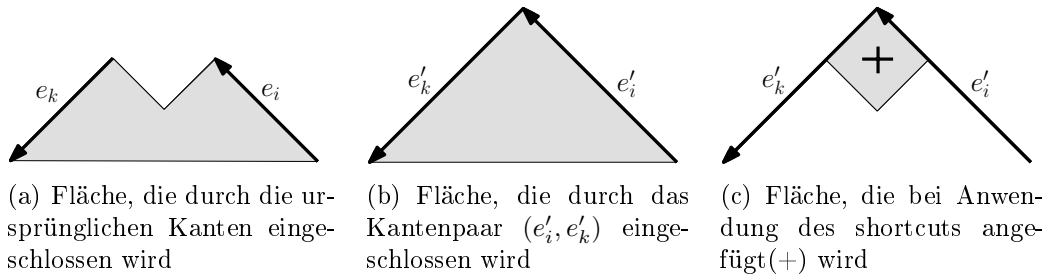


Abbildung 3.7: Bestimmung der Flächenänderung zwischen der Originalfläche und der neu entstehenden Fläche nach Anwendung des shortcuts  $(e_i, e_k)$ .

(Abbildung 3.7(a)). Diese Fläche bleibt für die Berechnung der Kosten aller zulässigen shortcuts konstant. Der Flächeninhalt  $F_0$  wird als die eingeschlossene Fläche der ursprünglichen Kanten nach der Gaußschen Flächenberechnung ermittelt.

Es wird die Funktion  $F' : S \rightarrow \mathbb{R}_0^+$  eingeführt, welche die Gebäudefläche nach der Anwendung des shortcuts  $(e_i, e_k)$  berechnet (Abbildung 3.7(b)). Das heißt die Kanten  $e_i, e_{i+1}, \dots, e_k$  des Originalgrundrisses werden durch die nach Anwendung des shortcuts neu entstehenden Kanten  $e'_i$  und  $e'_k$  ersetzt und im Anschluss erfolgt die Flächenberechnung nach Gauss für dieses Polygon.

Die Berechnung der Flächendifferenz ergibt sich wie folgt:

$$\Delta F = |F'(e_i, e_k) - F_0|. \quad (3.7)$$

In Abbildung 3.7(c) ist dargestellt, dass bei Realisierung des shortcuts  $(e_i, e_k)$  beispielsweise eine Fläche zu der Originalfläche hinzugefügt wird.

Der Anteil der Flächenänderung an der Originalfläche bestimmt die anzusetzenden Kosten für den jeweiligen shortcut.

$$c_{\text{Fläche}} = \frac{\Delta F}{F_0} \quad (3.8)$$

Für den Fall, dass an einer Stelle eine Fläche ausgeschnitten und an anderer Stelle eine Fläche gleicher Größe hinzugefügt wird, gibt es keine Flächenänderung. Es findet ein Flächenausgleich statt. Diesen Zusammenhang verdeutlicht Abbildung 3.8. Hier entspricht die Größe der abgeschnittenen Fläche der Größe der hinzugefügten Fläche (Abbildung 3.8(c)) und somit ist die Flächenänderung  $\Delta F = 0$ . Die Betrachtung der absoluten Flächenänderung, d.h. Flächenänderung mit Flächenausgleich, erscheint im Sinne der

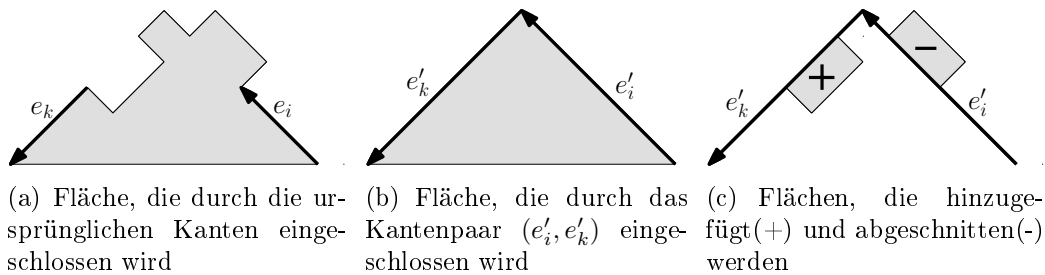


Abbildung 3.8: Keine Flächenänderung bei hinzugefügten und abgeschnittenen Flächen gleicher Größe.

Erhaltung der Gesamtfläche sinnvoll. Selbst bei großen Flächenänderungen, die mit einem Flächenausgleich kompensiert werden, ändert sich die Gesamtfläche nur wenig bzw. gar nicht.

Shortcuts, die eine geringe Flächenänderung bewirken, unter Umständen bedingt durch Flächenausgleich, erhalten somit geringe Kosten. Mit hohen Kosten werden hingegen shortcuts bestraft, die eine große Flächenänderung im Vergleich zur Gesamtfläche zur Folge haben.

### 3.2.4 Bestimmung der Gesamtkosten

Die Gesamtkosten je shortcut ergeben sich additiv aus den drei gewichteten Kostenfunktionen:

$$c = g_1 \cdot c_{Kante} + g_2 \cdot c_{Winkel} + g_3 \cdot c_{Fläche}, \quad (3.9)$$

wobei  $g_1, g_2$  und  $g_3 \in [0, 1]$  die Gewichte der entsprechenden Ziele definieren, sodass gilt:

$$\sum_{i=1}^3 g_i = 1.$$

Das Verfahren nach Haunert & Wolff (2008) wird mit den in Java implementierten Kostenfunktionen erweitert. Somit kann in dem folgenden Kapitel die Analyse der Kostenfunktionen anhand geeigneter Beispiele erfolgen.

# Kapitel 4

## Analyse der Kostenfunktionen

Die definierten Kostenfunktionen werden anhand einiger Beispielgrundrisse aus der Stadt Hannover analysiert. Neben den in Kapitel 3.1 vorgestellten Beispielen sollen weitere problembehaftete Beispiele untersucht werden. Es stellt sich die Frage, ob man tatsächlich mit den in Kapitel 3.2 definierten Kostenfunktionen bessere Generalisierungsergebnisse erzielen kann. Der Parameter  $M$  wird zunächst auf den Wert 0,8 festgelegt und im Verlauf der Analyse angepasst.

### 4.1 Analyse der einzelnen Kostenfunktionen

In diesem Kapitel erfolgt die getrennte Analyse der Kostenfunktionen. Das heißt die Kosten ergeben sich entweder aus der Kostenfunktion der Kantenlänge ( $c = c_{Kante}$ ), aus der Kostenfunktion der Rechtwinkligkeit ( $c = c_{Winkel}$ ) oder aus der Kostenfunktion der Flächenänderung ( $c = c_{Fläche}$ ). Die Ergebnisse der folgenden Beispiele sollen klären, ob mit den aufgestellten Kriterien jeweils gute Vereinfachungen erzielt werden können.

Bei dem ersten Beispiel (Abbildung 3.1) werden mittels des Verfahrens mit einheitlichen Kosten zum Teil sehr kurze, nicht repräsentative Kanten ausgewählt. In Folge dessen weicht der vereinfachte Grundriss in seiner Form deutlich von der charakteristischen, quadratischen Form des Originalgrundrisses ab. Mit Hilfe der Kostenfunktionen kann eine verbesserte Vereinfachung des Grundrisses erzielt werden. Abbildung 4.1 zeigt, dass die langen, repräsentativen Kanten des Grundrisses ausgewählt werden und somit die quadratische Struktur des Gebäudes erhalten bleibt. Das verbesserte Ergebnis kann mit

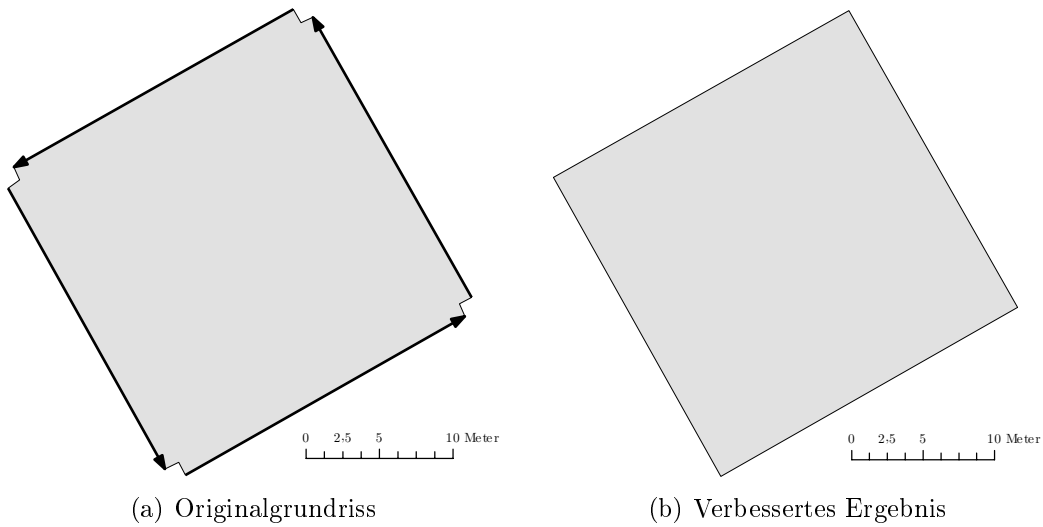


Abbildung 4.1: Vereinfachung eines einfachen, quadratischen Gebäudes mit  $\varepsilon = 2,5$  m.

allen drei Kostenfunktionen erreicht werden. Allerdings ergeben sich hierbei unterschiedliche Gesamtkosten für das Gebäude.

Mit dem Kriterium der Kantenlänge wird der Anteil der ursprünglichen Kanten an dem neuen Grundriss berücksichtigt. Dieser Anteil ist sehr groß, da nur in den Ecken verhältnismäßig kurze Kantenstücke eingefügt werden müssen. Es ergeben sich Gesamtkosten von 3,3768. Für die Berechnung der normierten Kosten werden zunächst die Gesamtkosten durch die Anzahl der shortcuts dividiert. Im Anschluss werden von dem Ergebnis noch die konstanten Grundkosten je shortcut abgezogen, die der vordefinierten Konstante  $M$  entsprechen. Für dieses Beispiel ergeben sich somit normierte Kosten von 0,0442 für jeden shortcut. Da es sich bei den Kosten, die mittels der Kostenfunktion der Kantenlänge bestimmt werden, um prozentuale Kosten handelt, kann eine Aussage über die Abweichung von dem idealen Zustand getroffen werden. Bei dem idealen Zustand entstehen keine Kosten. Bezüglich des Kantenkriteriums bedeutet dies, dass sich der shortcut komplett aus Originalkanten zusammensetzt, und keine Kantenstücke neu eingefügt werden müssen. In diesem Fall weicht jeder shortcut durchschnittlich um 4,42% von dem idealen Zustand ab, d.h. es werden entsprechend dem Prozentsatz Kantenstücke neu eingefügt.

Mit dem Kriterium der Rechtwinkligkeit ergeben sich Gesamtkosten von 3,2099. Sowohl die Gesamtkosten, als auch die normierten Kosten je shortcut mit 0,0025 sind sehr gering. Bei dem Winkel-Kriterium entstehen keine Kos-

ten, wenn die Winkel des vereinfachten Gebäudes exakt rechtwinklig sind. Die Kosten zeigen somit die Abweichungen der Winkel des vereinfachten Grundrisses von der Rechtwinkligkeit an. Da es sich bei dem vereinfachten Grundriss um eine nahezu rechtwinklige Gebäudeform handelt, sind die Kosten entsprechend gering. Das heißt jeder shortcut weicht durchschnittlich um 0,25% von der Rechtwinkligkeit ab. Das entspricht einem Winkel von  $0,23^\circ$ .

Bei der Anwendung des Kriteriums der Flächenänderung ergeben sich für das vereinfachte Gebäude Gesamtkosten von 3,2150 und normierte Kosten von 0,0037 je shortcut. Die Fläche ändert sich nur minimal, da nur kleine Flächen an den Ecken eingefügt werden müssen. Dies spiegelt sich auch in den geringen normierten Kosten wider.

Das zweite Beispiel ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Hierbei handelt es sich um ein rechtwinkliges Gebäude, das an einer Stelle einen kleinen Mauervorsprung besitzt. Mit dem Verfahren nach Haurert & Wolff (2008), d.h. dem Ansetzen von einheitlichen Kosten für jeden shortcut, ergibt sich eine ungeeignete Vereinfachung. Bedingt durch die Auswahl der kurzen Kante als shortcut bildende Kante verbreitert sich das Gebäude. Anstatt diesen unwichtigen Mauervorsprung zu eliminieren, wird eine große Fläche angefügt. Folglich vergrößert sich die Gesamtfläche des Gebäudes erheblich. Das vereinfachte Gebäude ist somit nicht mehr eindeutig als das Originalgebäude zu identifizieren, da sich die Proportionen deutlich verändert haben. Um eine bessere Vereinfachung zu erzielen, betrachtet man die Flächenänderung. Diese Änderung ist deutlich größer, wenn die kurze Kante ausgewählt wird, da eine große Fläche hinzugefügt werden muss. Folglich wird nicht die kurze Kante ausgewählt und im Zuge dessen der Mauervorsprung eliminiert. Für die Gesamtkosten ergibt sich ein Wert von 3,2113. Mit der Anwendung des Kantenlänge-Kriteriums ergibt sich das gleiche Ergebnis mit nahezu identischen Gesamtkosten von 3,2136. Mit dem Kriterium der Rechtwinkligkeit wird keine Verbesserung erzielt, da beide Lösungen eine rechtwinklige Struktur aufweisen, und somit die Kosten für beide Vereinfachungen identisch sind.

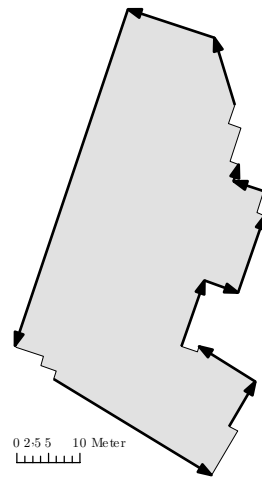
Es zeigt sich, dass mit den drei Kostenfunktionen für einfachere Gebäude gute Ergebnisse erzielt werden können. Mit dem Kanten- und Flächenkriterium sind die erzielten Ergebnisse meist gleichwertig. In einigen Fällen liefert das Winkelkriterium ein davon abweichendes Ergebnis. Insbesondere bei exakt rechtwinkligen Gebäuden, bei denen jede mögliche Lösung minimaler Kantenanzahl die optimalen und somit identischen Kosten erhält, führt das Winkelkriterium häufig nicht zu dem besten Ergebnis. Das heißt die alleinige Gewichtung des Winkelkriteriums erscheint für diese Fälle nicht sinnvoll. Allerdings kann in Kombination mit einem anderen Kriterium ein besseres



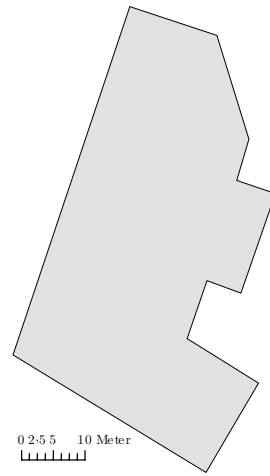
Abbildung 4.2: Vereinfachung eines einfachen, rechtwinkligen Gebäudes mit  $\varepsilon = 3,0$  m.

Ergebnis erzielt werden. Dieser Sachverhalt wird in Kapitel 4.2 näher betrachtet. Im Folgenden sollen komplexere Gebäude untersucht werden.

Abbildung 4.3 zeigt ein größeres Gebäude, welches sich aus zwei Gebäudeteilen zusammensetzt, die in einem stumpfen Winkel zueinander stehen. Die Struktur der einzelnen Gebäudeteile ist größtenteils rechtwinklig. Die Vereinfachung mit dem Verfahren der einheitlichen Kosten liefert ein unbefriedigendes Ergebnis (siehe Abbildung 3.3). Die charakteristische, parallele Struktur des Gebäudes, insbesondere des unteren Gebäudeteiles, geht verloren. Bei Anwendung des Kriteriums der Kantenlänge wird das Gebäude besser generalisiert, da ausschließlich die repräsentativen Kanten des ursprünglichen Gebäudes ausgewählt werden. Die parallele Struktur bleibt erhalten. Die Gesamtkosten belaufen sich auf 9,9815. Daraus ergeben sich normierte Kosten von 0,1074 je shortcut. Jeder shortcut besteht somit durchschnittlich aus



(a) Originalgrundriss



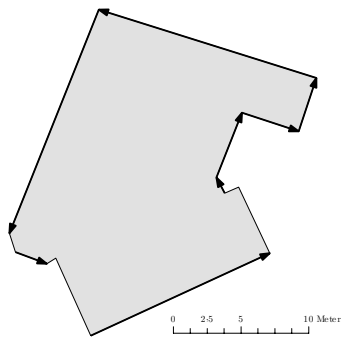
(b) Verbessertes Ergebnis

Abbildung 4.3: Vereinfachung eines winkligen Gebäudes mit  $\varepsilon = 2,5$  m.

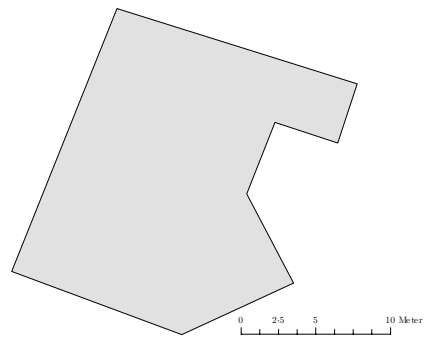
10,74% neu hinzugefügten Kanten. Es zeigt sich, dass mit der Komplexität der Objekte auch die normierten Kosten steigen. In diesem Fall ist die Anwendung des Rechtwinkligkeits-Kriteriums nicht sinnvoll, da die charakteristische, nicht-rechtwinklige Struktur des Gebäudes erhalten bleiben sollte.

Ein ähnliches Problem wird in Abbildung 4.4 dargestellt. Das Originalgebäude setzt sich aus zwei rechtwinkligen Gebäudeteilen zusammen, die in einem stumpfen Winkel zueinander stehen. Nach der Vereinfachung mit einheitlichen Kosten ist diese charakteristische Struktur nicht mehr erkennbar, und das Gebäude ist nicht eindeutig als das Ausgangsobjekt zu identifizieren. Mit der Anwendung des Kantenkriteriums kann eine deutliche Verbesserung erzielt werden. Die charakteristische Struktur des Gebäudes bleibt erhalten. Allerdings muss in diesem Fall die Konstante  $M$  auf den Wert 0,3 gesetzt werden, damit das Minimierungskriterium nicht zu stark greift und die Minimalanzahl der Kanten verlangt. In diesem Fall ist es sinnvoll, eine Kante mehr als die minimale Anzahl auszuwählen, um eine bessere Vereinfachung zu erzielen. Bei der Auswahl der zusätzlichen Kante (in Abbildung 4.4(c) rot eingekreist) wird das Original besser repräsentiert. Die Gesamtkosten belaufen sich auf 3,1302. Die normierten Kosten betragen 0,0478 je shortcut. Die Anwendung des Rechtwinkligkeits-Kriteriums wäre in diesem Fall nicht sinnvoll, da das Gebäude keine rechtwinklige Struktur aufweist.

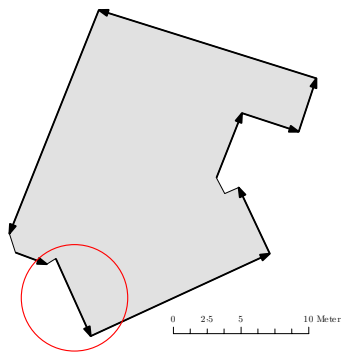
Abbildung 4.5 zeigt ein U-förmiges Gebäude, für das die Optimierung mit einheitlichen Kosten ein ungeeignetes Ergebnis erzielt. Die charakteristische, symmetrische Struktur des Originalgebäudes ist in dieser Lösung nicht er-



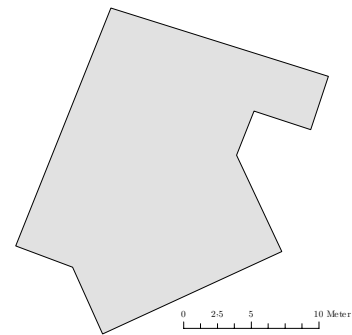
(a) Originalgrundriss mit den ausgewählten Kanten von (b)



(b) Ungeeignetes Ergebnis



(c) Originalgrundriss mit den ausgewählten Kanten von (d)



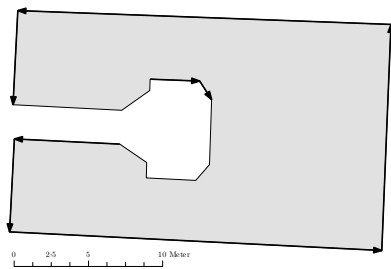
(d) Verbessertes Ergebnis

Abbildung 4.4: Vereinfachung eines Gebäudes mit  $\varepsilon = 2,5$  m.

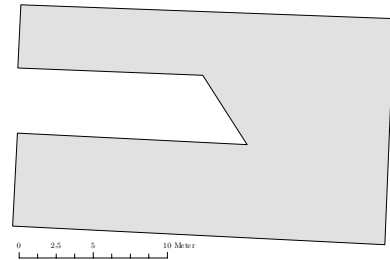
kennbar. Hingegen liefert die Vereinfachung mit dem Kantelängen-Kriterium ein gutes Ergebnis, welches die charakteristische, symmetrische U-Form des Gebäudes gut widerspiegelt. Die Gesamtkosten betragen 7,1287. Somit ergeben sich für jeden shortcut normierte Kosten von 0,0911. Folglich werden nur in einem geringen Umfang zusätzliche Kantenstücke eingefügt und der Großteil der Kanten des vereinfachten Grundrisses setzt sich aus ursprünglichen Kanten zusammen.

Sowohl die Anwendung des Rechtwinkligkeits-Kriteriums als auch des Kriteriums der Flächenänderung liefert für dieses Beispiel schlechtere Ergebnisse. Die alleinige Anwendung dieser Kriterien reicht nicht aus, um gute Generalisierungsergebnisse zu erzielen. Aber in Kombination mit anderen Kriterien ist eine Verbesserung der Ergebnisse durchaus möglich. Die problembehafteten Vereinfachungen sind in Abbildung 4.6 dargestellt. Die Lösung des Pro-

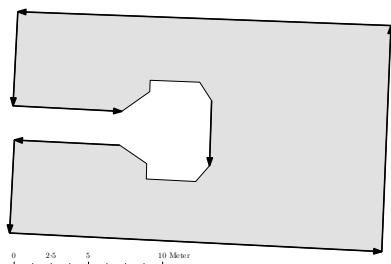




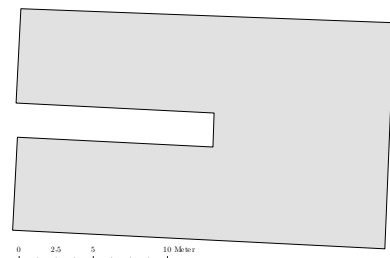
(a) Originalgrundriss mit den ausgewählten Kanten von (b)



(b) Un geeignetes Ergebnis



(c) Originalgrundriss mit den ausgewählten Kanten von (d)



(d) Verbessertes Ergebnis mit dem Kantenkriterium

Abbildung 4.5: Vereinfachung eines Gebäudes mit  $\varepsilon = 2,5$  m.

blems mit dem Anspruch der Rechtwinkligkeit führt zu mehreren möglichen Ergebnissen mit gleichen Kosten. Dieser Sachverhalt ist bedingt durch die rechtwinklige Struktur des Gebäudes. Mit dem Flächenkriterium wird ausschließlich die Flächenänderung des shortcuts betrachtet, d.h. wenn an einer Stelle eine Fläche hinzugefügt und an anderer Stelle eine Fläche gleicher Größe abgeschnitten wird, ist die Flächenänderung Null. Dieser Sachverhalt führt hier zu der problembehafteten Lösung in Abbildung 4.6(b).

In Abbildung 4.7 ist die Vereinfachung einer Kirche dargestellt. Die typischen Merkmale der Kirche, d.h. die rechtwinklige und symmetrische Struktur, sind in der problembehafteten Vereinfachung (siehe Abbildung 3.2) nicht zu erkennen. Hingegen liefert die Vereinfachung mit dem Kriterium der Rechtwinkligkeit ein besseres Ergebnis. Die Gesamtkosten betragen 12,9115. Daraus ergeben sich normierte Kosten von 0,0070. Somit weichen die Winkel durchschnittlich um 0,70% von einem rechten Winkel ab. Das entspricht einem Winkel von  $0,63^\circ$ . Die Abweichung ist minimal und folglich ist die Struktur des vereinfachten Grundrisses nahezu rechtwinklig. Die Lösung mit dem Kriterium der Rechtwinkligkeit liefert ein sehr gutes und nahezu optimales Ergebnis. Die Vereinfachung mit dem Kriterium der Kantenlänge

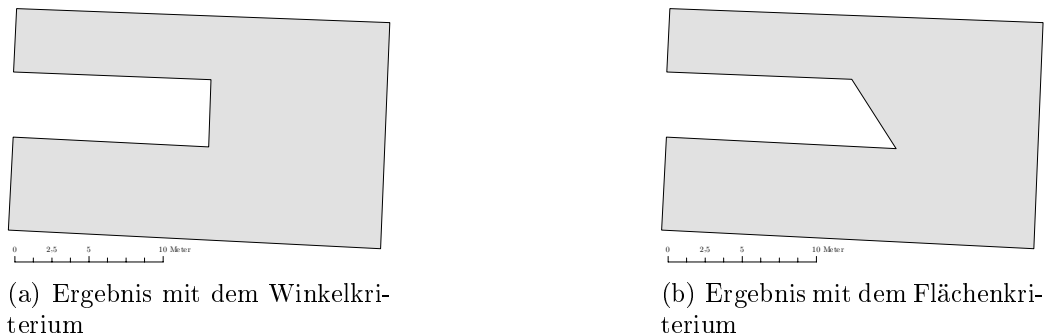


Abbildung 4.6: Ungeeignete Vereinfachungen eines Gebäudes mit  $\varepsilon = 2,5$  m.

erzielt deutlich höhere Kosten von 18,5793. Außerdem sind in den Ergebnissen der beiden Lösungen große Qualitätsunterschiede zu erkennen. Die Vereinfachung mit dem Kantenkriterium stellt zwar eine Verbesserung zu der problembehafteten Lösung dar, aber ist nicht vergleichbar mit dem guten Generalisierungsergebnis des Winkelkriteriums.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass alle drei Kostenfunktionen für einfache Problemfälle gute Ergebnisse liefern. Die Lösung mittels des Flächenkriteriums unterscheidet sich hier kaum von der Lösung mit dem Kriterium der Kantenlänge. Bei komplexeren Gebäuden zeigt sich, dass das Flächenkriterium bedingt durch den Sachverhalt, dass nur die absolute Flächenänderung betrachtet wird, häufig unbefriedigende Ergebnisse liefert. Dieses Problem und die Tatsache, dass sich die Ergebnisse der Lösung mit Flächen- und Kantenkriterium bei einfachen Objekten nur bedingt voneinander unterscheiden, führt zu dem Ausschluss des Flächenkriteriums aus der folgenden Analyse der kombinierten Kostenfunktionen. Mit den Kriterien der Rechtwinkligkeit und der Kantenlänge können hingegen gute Vereinfachungen komplexer Objekte erzielt werden. Allerdings liefert in speziellen Fällen nur die Anwendung einer der beiden Kostenfunktionen gute Ergebnisse. Als Beispiele lassen sich hier das U-förmige Gebäude (Abbildung 4.5) für das Kantenkriterium bzw. die Kirche (Abbildung 4.7) für das Winkelkriterium nennen. Des Weiteren zeigt sich in den vorgestellten Beispielen, dass ein Zusammenhang zwischen den bei der Generalisierung entstehenden normierten Kosten und der Qualität der Generalisierung besteht. Niedrige Kosten gehen meist mit einer qualitativ hochwertigen Generalisierung einher. Der vereinfachte Grundriss spiegelt hierbei gut die charakteristischen Eigenschaften der Gebäude wider. Wobei hohe Kosten oft bei ungeeigneten Vereinfachungen erzielt werden. Somit lassen sich die normierten Kosten als Qualitätsindikator der Generalisierung interpretieren.

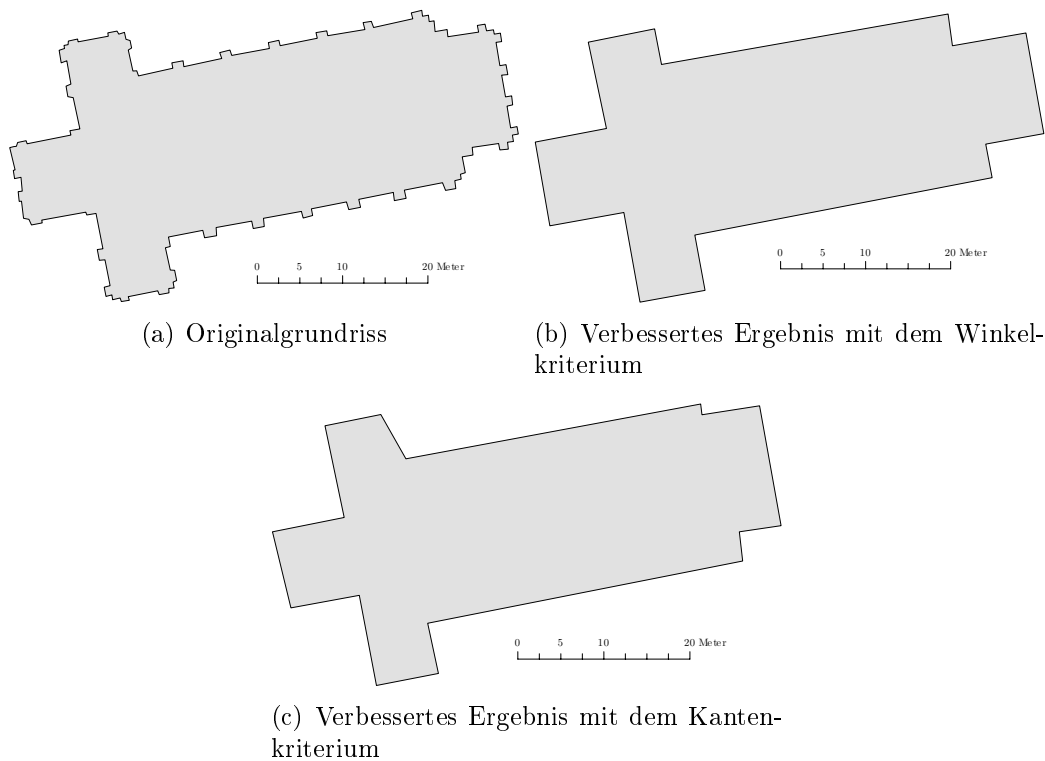


Abbildung 4.7: Vereinfachung einer Kirche mit  $\varepsilon = 2,0$  m.

Das Ziel des folgenden Kapitels soll sein, die Kostenfunktionen zu kombinieren und Gewichte festzusetzen, damit für möglichst viele Objekte gleichwertig gute Ergebnisse erzielt werden können. Die Festlegung eines Parametersatzes soll die Generalisierung eines größeren Gebietes ermöglichen, ohne für jedes Gebäude zunächst die optimale Kostenfunktion bestimmen zu müssen.

## 4.2 Analyse der kombinierten Kostenfunktionen

Anhand geeigneter Beispiele soll eine Kombination der Kostenfunktionen entwickelt werden, mit der für möglichst viele Gebäude eine gute Vereinfachung erzielt werden kann.

In Abbildung 4.8 sind zwei weitere Vereinfachungen der Kirche aus Abbildung 4.7 dargestellt. Die Gleichgewichtung der Kosten aus den Kriterien der Kantenlänge und der Rechtwinkligkeit erzielt die in Abbildung 4.8(a) darge-

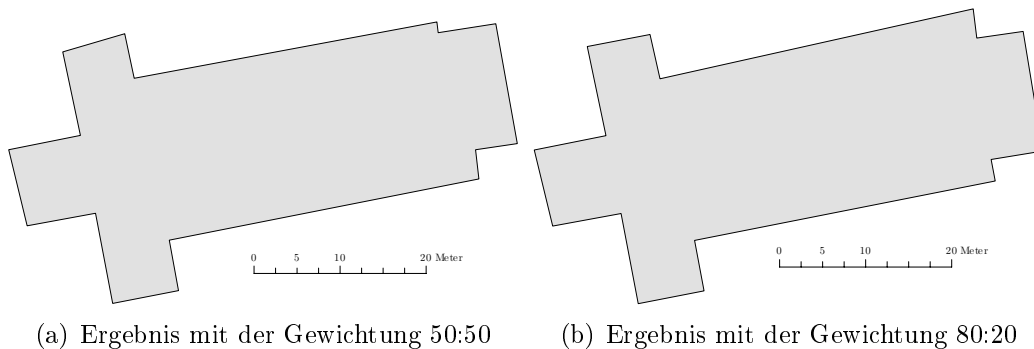


Abbildung 4.8: Vereinfachung eines Gebäudes mit  $\varepsilon = 2,0$  m.

stellte Vereinfachung. Die Vereinfachung repräsentiert das Originalgebäude relativ gut. An einigen Stellen der Kirche bilden die vereinfachten Kanten keinen rechten Winkel. Diese Tatsache ist bedingt durch die Herabgewichtung des Rechtwinkligkeits-Kriteriums. Für den vereinfachten Grundriss entstehen Gesamtkosten von 15,8867. Nach Abzug der Grundkosten entfallen davon 0,1910 auf das Rechtwinkligkeits-Kriterium und 2,8958 auf das Kriterium der Kantenlänge. Die normierten Kosten betragen 0,1929 je shortcut.

Bei der Gewichtung der Kosten aus der Rechtwinkligkeits-Kostenfunktion mit 80% und der Kosten aus der Kantenlänge-Kostenfunktion mit 20% wird das Ergebnis in Abbildung 4.8(b) erzeugt. Wenn ausschließlich die Kosten aus dem Rechtwinkligkeits-Kriterium verwendet werden, führt das dazu, dass rechtwinklige shortcuts ausgewählt werden, die sich aber unter Umständen aus zwei wenig repräsentativen Kanten des Originalgrundrisses zusammensetzen. Der Grundriss der Kirche ist allerdings nicht vollständig rechtwinklig, sondern besitzt viele schiefe Wände, die nicht in einem rechten Winkel zueinander stehen. Dieses charakteristische Erscheinungsbild sollte sich in dem vereinfachten Grundriss wiederfinden. Mit dem Einbezug des Kriteriums der Kantenlänge wird neben der Abweichung des shortcuts von der Rechtwinkligkeit auch noch die Länge der shortcut bildenden Kanten berücksichtigt. Bei dieser Vereinfachung entstehen Gesamtkosten von 14,1914, wovon nach Abzug der Grundkosten ein Anteil von 0,1811 aus der Winkel-Kostenfunktion und von 1,2103 aus der Kanten-Kostenfunktion stammten. Es ergeben sich normierte Kosten von 0,0870 je shortcut. Der Vergleich aller erzielten Vereinfachungen der Kirche zeigt, dass mit dem Rechtwinkligkeits-Kriterium das beste Ergebnis erzielt werden konnte. Je höher man also das Rechtwinkligkeitskriterium gewichtet, desto besser wird das Ergebnis. Allerdings ist das Ziel dieses Kapitels, eine Kombination der Kostenfunktionen festzulegen, damit möglichst viele Gebäude gleichwertig gut generalisiert werden kön-

nen. Die alleinige Anwendung des Rechtwinkligkeits-Kriteriums liefert aber in vielen Fällen unbefriedigende Ergebnisse, bei denen hingegen die Anwendung des Kantenlänge-Kriteriums gute Vereinfachungen erzielt. Folglich ist ein Kompromiss anzustreben.

Das winklige Gebäude aus Abbildung 4.3 wird bei Gleichgewichtung der Kostenfunktionen in der gleichen Weise vereinfacht, wie bei der alleinigen Berücksichtigung der Kantenlänge. Die Gesamtkosten bei der Gleichgewichtung betragen 10,0815. Nach Abzug der Grundkosten entfallen davon Kosten von 0,6907 auf das Winkelkriterium und Kosten von 0,5908 auf das Kantenkriterium. Die Kosten, die sich aus der Winkel-Kostenfunktion ergeben, sind höher, da das Gebäude keine rechtwinklige Struktur aufweist. Das Rechtwinkligkeits-Kriterium liefert hingegen nur günstige Vereinfachungen, wenn eine rechtwinklige Struktur vorliegt. Die normierten Kosten betragen 0,1165 je shortcut. In diesem Fall würde die Herabgewichtung des Rechtwinkligkeits-Kriteriums zu 20% eine bessere Vereinfachung liefern. Folglich stellt die Gleichgewichtung der Kostenfunktionen einen guten Kompromiss dar, um sowohl für Gebäude rechtwinkliger Struktur, als auch für winklige Gebäude eine gute Vereinfachung zu erzielen.

Abbildung 4.5 zeigt die Vereinfachung eines U-förmigen Gebäudes, bei dem ausschließlich mit der Beachtung der Kantenlänge ein gutes Ergebnis erzielt werden konnte. Bei einer gleichgewichteten Kombination der Kriterien ergibt sich ein gleichwertiges Ergebnis (Abbildung 4.5(d)). Die Gesamtkosten betragen 6,7841. Nach Abzug der Grundkosten entfallen davon Kosten von 0,0197 auf die Winkel und Kosten von 0,3643 auf die Kantenlänge. Die normierten Kosten betragen 0,0480 je shortcut. Bei Interpretation der entstehenden Kosten als Gütekriterium der Generalisierung, deuten diese geringen Kosten auf eine gute Vereinfachung hin. Diese Feststellung belegt auch der vereinfachte Grundriss. Dieser spiegelt die charakteristischen Merkmale des Originalgrundrisses wider. Des Weiteren werden die Ansprüche der Gebäudegeneralisierung (Rechtwinkligkeit, Parallelität) nahezu optimal erfüllt.

Anhand einer komplexeren Kirche (Abbildung 4.9) mit speziellen charakteristischen Eigenschaften (halbrunder Anbau) soll die Kombination der Kostenfunktionen daraufhin überprüft werden, ob schwierige Probleme in geeigneter Weise vereinfacht werden können. Der halbrunde Anbau ist in dem vereinfachten Grundriss nicht mehr zu erkennen. Dieses Problem lässt sich mit dem großen Toleranzbereich von  $\varepsilon = 2,5$  m und der Forderung nach rechtwinkligen shortcuts durch das Winkelkriterium begründen. Dennoch kann man in Abbildung 4.9(c) das Originalgebäude eindeutig identifizieren. Trotz der Komplexität dieses Objektes kann mit der Gleichgewichtung der Kos-

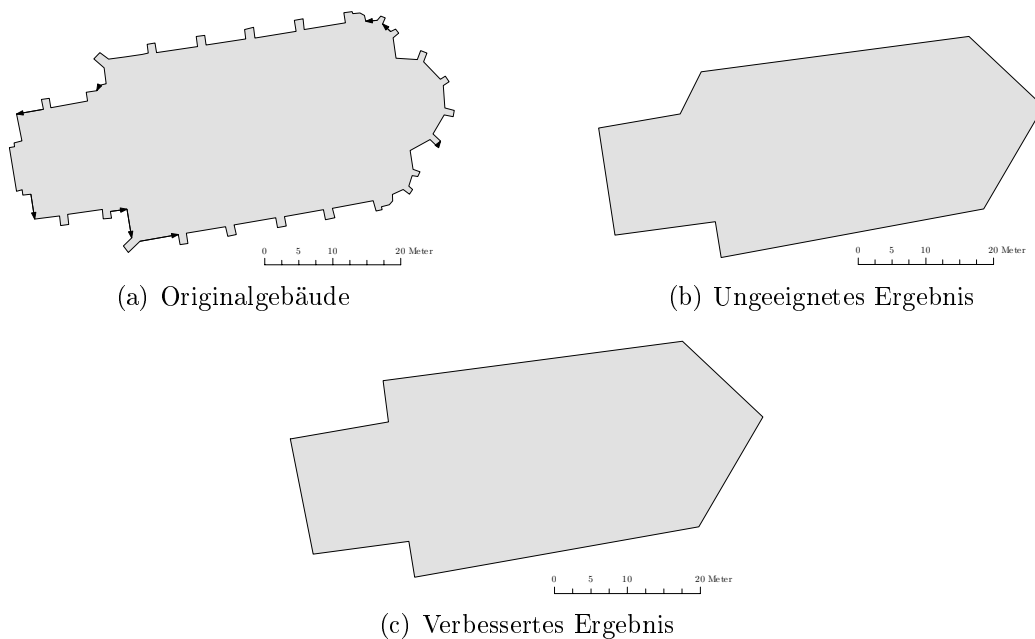


Abbildung 4.9: Vereinfachung eines Gebäudes mit  $\varepsilon = 2,5$  m.

tenfunktionen eine angemessene aber problembehaftete Vereinfachung erzielt werden. Die Gesamtkosten betragen 9,9637 und davon entfallen, nach Abzug der Grundkosten, Kosten von 0,5707 auf das Winkelkriterium und Kosten von 2,1930 auf das Kantenkriterium. Daraus ergeben sich normierte Kosten von 0,3071 je shortcut. Die Höhe dieser Kosten lässt darauf schließen, dass die Qualität der Generalisierung nicht optimal ist. Das heißt die teuren Kosten bestätigen die Feststellung, dass die Vereinfachung des komplexen Gebäudes eine problembehaftete Lösung darstellt. Allerdings ist im Hinblick auf das ungeeignete Ergebnis (Abbildung 4.9(b)), das mit einheitlichen Kosten erzielt wurde, eine Verbesserung zu erkennen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass mit einer Gleichgewichtung des Winkel- und Kantenkriteriums selbst für komplexe Objekte gute Ergebnisse erzielt werden können. Für diese Objekte lieferte sonst nur eine der beiden Kostenfunktionen ein befriedigendes Ergebnis. Der Parameter  $M$  repräsentiert das Minimierungskriterium. Für den Fall, dass die minimale Anzahl der Kanten gefordert ist, muss ein großer Wert für  $M$  gewählt werden. In manchen Fällen erscheint es allerdings sinnvoller, etwas mehr als die minimale Anzahl der Kanten auszuwählen, damit die charakteristischen Eigenschaften in dem vereinfachten Grundriss erhalten bleiben. Eliminiert man diesen konstanten Anteil, entspricht das Ergebnis dem Original. Da die Kostenfunktionen pro-

zentuale Abweichungen darstellen und um das Minimierungskriterium nicht zu stark zu gewichten, wird der Parameter  $M$  auf den Wert  $0,1$  festgelegt. Die obigen Beispiele wurden mit  $M = 0,8$  bearbeitet, aber bei einer Änderung des Parameters  $M$  auf den Wert  $0,1$  verändern sich nicht die Ergebnisse. Hingegen können für einige komplexere Gebäude nur mit einem niedrigen Wert von  $M$  gute Vereinfachungen erzielt werden (z.B. Abbildung 4.4).

### 4.3 Auswertung eines größeren Testgebietes

Die Auswertung eines größeren Testgebietes soll klären, ob die aufgestellten Kriterien für eine Vielzahl unterschiedlicher Objekte gleichwertig gute Ergebnisse erzielen. Das zu untersuchende Gebiet aus Abbildung 4.10 ist ein Ausschnitt aus der Grundrissdatei der Stadt Hannover. Die Generalisierung erfolgt mit der im vorherigen Kapitel bestimmten Kombination der Kostenfunktionen.

Abbildung 4.11 zeigt das Ergebnis, in dem farblich die normierten Kosten der vereinfachten Gebäude dargestellt sind. Die farbliche Gestaltung kennzeichnet somit die Qualität der Generalisierung des jeweiligen Gebäudes. Die roten Linienverläufe kennzeichnen die Originalgrundrisse. Die Qualität der Generalisierung ist bei niedrigen Kosten am besten. Der Großteil der Gebäude kann mit sehr niedrigen normierten Kosten von unter  $0,05$  vereinfacht werden. Bei komplexeren Gebäuden steigen die Kosten, bedingt durch größere Veränderungen, auf bis zu  $0,10$ . Gebäude meist winkliger Struktur, die dem charakteristischen, rechtwinkligen Erscheinungsbild von Gebäuden widersprechen, erzielen etwas höhere Kosten von bis zu  $0,15$ . Für diese Fälle unterschiedlicher Kosten liefert das Verfahren gute Vereinfachungen. Das heißt bis zu einem Kostenwert von  $0,15$  kann man von einer guten Qualität der Vereinfachung sprechen.

Das Testgebiet beinhaltet allerdings auch zwei Problemfälle. Zum einen ein Gebäude mit einem sehr speziellen, unregelmäßigen Grundriss. Die Kosten sind mit  $0,34$  deutlich höher als die Kosten der umliegenden Gebäude. Die Vereinfachung liefert hier einen Grundriss der nicht mehr eindeutig dem Original zugeordnet werden kann, da die charakteristischen Merkmale nicht angemessen bewahrt werden. Das Problem ist, dass dieses Gebäude jeglichen Ansprüchen der Gebäudegeneralisierung widerspricht (u.a. Parallelität, Rechtwinkligkeit) und somit nur eine teure Lösung erzielt werden kann. Das zweite Problemgebäude ist ein längliches, winkliges Objekt, das bei der Vereinfachung Kosten von  $0,21$  erzielt. Zwar ändert sich nicht die Form des Ge-



Abbildung 4.10: Darstellung des Testgebietes.

bäudes und ist auch nach der Generalisierung eindeutig als das Ausgangsobjekt zu identifizieren, trotzdem scheint die Generalisierung in diesem Fall eine schlechte Vereinfachung erzielt zu haben. Dieser Sachverhalt lässt sich damit erklären, dass sich das Gebäude aus vielen kurzen Kanten zusammensetzt, was auf den ersten Blick nicht erkennbar ist. Obwohl es den Anschein hat, dass das vereinfachte Gebäude exakt aus den Kanten des Originalgebäudes besteht, hat sich die Kantenanzahl minimiert. Die ausgelassenen Kanten befinden sich auch nicht mehr in dem schmalen Puffer um das L-shape. Folglich mussten neue Kantenstücke eingefügt werden. Bedingt durch den Sachverhalt, dass das Gebäude eine längliche Struktur hat, sind diese neu eingefügten Strecken zum Teil sehr lang. Eine weitere ungünstige Tatsache, die sich auf die Höhe der Kosten auswirkt, ist die nicht-rechtwinklige Struktur des Gebäudes.



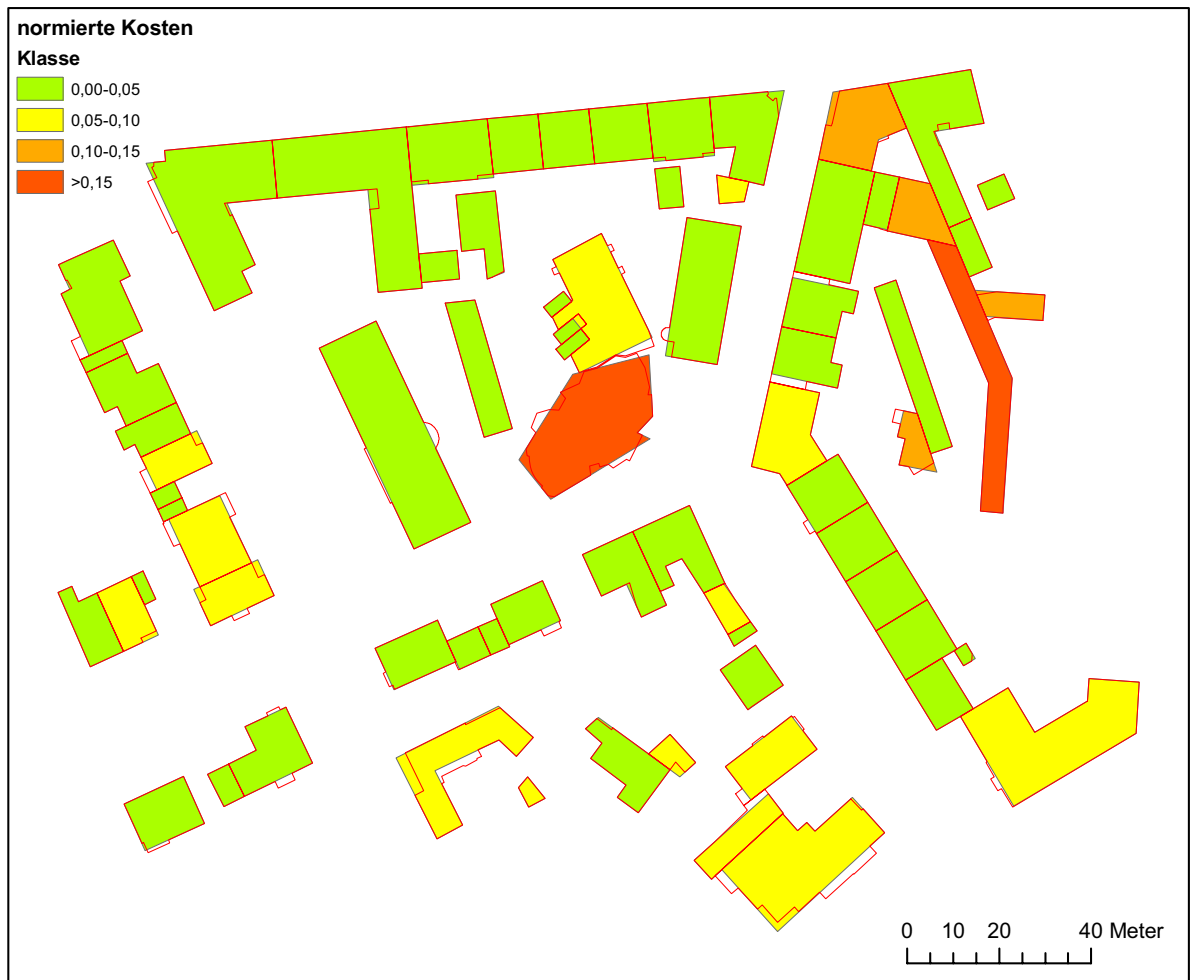


Abbildung 4.11: Vereinfachung des Testgebietes mit  $\varepsilon = 2,5$  m.

Ein anderes, in dem Testgebiet zu erkennendes, Problem ist der fehlende Bezug zu benachbarten Objekten bei der Generalisierung. Das führt zu Überschneidungen benachbarter, generalisierter Gebäude, die besonders offensichtlich in dem Gebäude oberhalb des ersten Problemfalles zu erkennen sind. Eine weitere Folge des fehlenden Bezugs ist zu beobachten: Bei Reihenhäusern liegen die Vorder- bzw. Rückkanten der Häuser meist nicht auf einer Höhe. Die Ursache hierfür liegt darin, dass bei manchen Gebäuden ein Vorsprung ausreichender Länge die neue Gebäudekante repräsentiert. Diese Lösung stellt die optimale Lösung bei Einzelbetrachtung dar, aber in Bezug zu benachbarten Objekten wäre die Vernachlässigung dieses Vorsprungs sinnvoll. Dieses Problem zeigt sich z.B. bei dem zweiten Haus von rechts in der am oberen Bildrand verlaufenden Häuserreihe.

Zusammenfassend lässt sich dennoch sagen, dass die Auswertung des Testgebietes trotz der Problemfälle erfolgreich war. Für den Großteil der Gebäude konnten gute Generalisierungsergebnisse erzielt werden.

## 4.4 Probleme

Die Erhaltung spezieller charakteristischer Eigenschaften von Gebäuden stellt ein wesentliches Problem bei der Vereinfachung mit der oben beschriebenen Zielfunktion dar. Die symmetrische Struktur von Gebäuden, z.B. Kirchen,

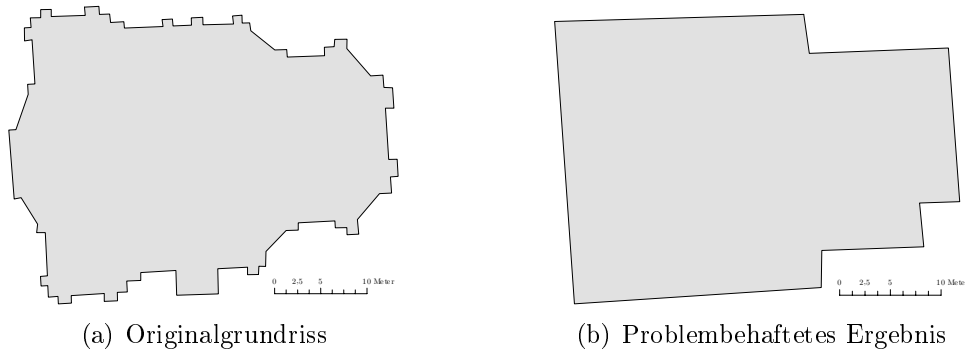


Abbildung 4.12: Vereinfachung eines Gebäudes mit  $\varepsilon = 2,5$  m.

sollte bewahrt werden, damit dieses Objekt in kleinerem Maßstab eindeutig als das Originalgebäude identifiziert werden kann. Abbildung 4.12 zeigt die Vereinfachung einer symmetrischen Kirche. Nach der Generalisierung handelt es sich um ein asymmetrisches Objekt, das nicht mehr eindeutig und auf den ersten Blick als Kirche erkannt wird.

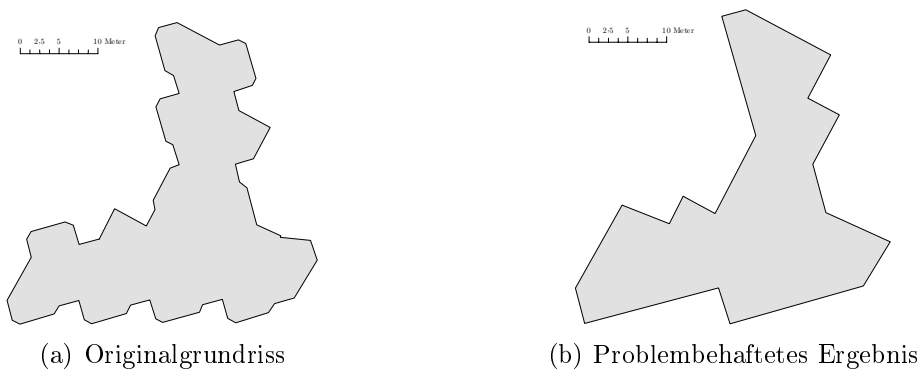


Abbildung 4.13: Vereinfachung eines Gebäudes mit  $\varepsilon = 2,5$  m.

Des Weiteren können für besonders spezielle Gebäude nur unbefriedigende Ergebnisse erzielt werden. Die Erhaltung dieser speziellen, charakteristischen Eigenschaften, z.B. unregelmäßiger Grundriss (Abbildung 4.13), halbrunder Anbau (Abbildung 4.9), kann mit diesen Zielfunktionen nicht realisiert werden. Die Abbildung 4.13 stellt ein sehr spezielles Gebäude dar, bei dem die charakteristische, unregelmäßige Form relativ gut, aber nicht optimal in der Vereinfachung repräsentiert wird.

# Kapitel 5

## Zusammenfassung und Ausblick

Die getrennte Analyse der Kostenfunktionen hat gezeigt, dass sich die Kriterien der Kantenlänge und der Rechtwinkligkeit sowohl für einfache, als auch für komplexere Objekte eignen. Die erzielten Ergebnisse stellen gute Vereinfachungen im Sinne der Gebäudegeneralisierung dar. Hingegen liefert das Flächenkriterium nur für einfache Gebäude gute Ergebnisse. Mit steigender Komplexität der Gebäude verringert sich hierbei auch die Qualität der Generalisierung. Um mit diesem Kriterium bessere Ergebnisse zu erzielen, wäre es sinnvoll, die Gesamtsumme der hinzugefügten und abgeschnittenen Flächen zu betrachten. Die Abbildung 3.8 verdeutlicht, dass bei abgeschnittenen und hinzugefügten Flächen gleicher Größe, die Flächenänderung, bedingt durch den Flächenausgleich, Null ist. Das hat zur Folge, dass diese Flächen sehr groß werden können. Daraus resultierend kann sich der vereinfachte Grundriss deutlich von der Originalform unterscheiden. Bei Betrachtung der Gesamtsumme können diese großen Veränderungen des Gebäudes besser erkannt werden. Neben den aufgestellten Kostenfunktionen wäre die Integration weiterer Kostenfunktionen in die Zielfunktion denkbar.

Die Analyse der kombinierten Kostenfunktionen führte zu dem Ergebnis, dass mit der Gleichgewichtung der Kosten aus den Kriterien der Kantenlänge und der Rechtwinkligkeit sinnvolle Ergebnisse erzielt werden können. Bei Erhöhung einer Komponente und daraus resultierender Herabgewichtung der anderen, können spezielle Probleme besser gelöst werden. Aber um die Vereinfachung möglichst vieler Objekte mit gleichwertig guten Ergebnissen zu gewährleisten, bietet sich der Kompromiss der Gleichgewichtung an.

Die Optimierung mit Einbindung weiterer Optimierungsziele stellt ein sehr vielseitiges Verfahren zur Generalisierung dar, welches sich für unterschiedli-

che Anwendungen eignet. Um das Verfahren der jeweiligen Anwendung anzupassen werden die Parameter verändert. Für die Aufgabe der Datenreduktion müsste man zum Beispiel die Konstante  $M$  hoch setzen, damit das Minimierungskriterium stärker berücksichtigt wird. Besteht zum Beispiel die Aufgabenstellung die Versiegelung eines bestimmten Gebietes festzuhalten, sollte sich die Gesamtfläche der Gebäude im Zuge der Generalisierung nur wenig ändern. Für diesen Fall wäre es sinnvoll, das Gewicht für das Flächenkriterium zu erhöhen, damit nur shortcuts ausgewählt werden, die eine geringe Flächenänderung bewirken.

Um die geeignete Generalisierung der problembehafteten Gebäudetypen aus Kapitel 4.4 zu ermöglichen, müsste das Verfahren erweitert werden.

Zum Beispiel werden runde Gebäudewände nur schlecht berücksichtigt. Derzeitig setzen sich diese Gebäudeteile aus vielen kurzen, geraden Kanten zusammen. Im Zuge der Minimierung der Kantenanzahl wird ein Großteil dieser Kanten eliminiert. Allerdings kann ein Bruchteil der ursprünglichen Kanten nicht die runde Form in geeigneter Weise repräsentieren. Daher wäre es an dieser Stelle sinnvoll, die vielen kurzen Kanten durch ein Kreissegment zu ersetzen.

Zur Erhaltung der symmetrischen Struktur von Gebäuden, wäre die Aufstellung weiterer Nebenbedingungen sinnvoll. Die zusätzlichen Bedingungen sollen gewährleisten, dass man symmetrisch gegenüberliegende shortcuts nur zusammen entfernen oder erhalten kann.

Ein weiteres Problem stellt der fehlende Bezug zwischen benachbarten Gebäuden dar. Dieses Problem führt zu Überschneidungen und zu nicht angepassten Übergängen zwischen den Häusern. Zur Lösung dieser Probleme müsste der Bezug zwischen benachbarten Gebäuden bei der Generalisierung hergestellt werden.

# Literaturverzeichnis

- Bard, S. 2004. Quality Assessment of Cartographic Generalization. *Transactions in GIS*, **8**(1), 63–81.
- Bose, P., Cabello, S., Cheong, O., Gudmundsson, J., van Krefeld, M., & Speckmann, B. 2006. Area-preserving approximations of polygonal paths. *Journal of Discrete Algorithms*, **4**, 554–556.
- Campbell, G. M., & Cromley, R. G. 1991. Optimal Simplification of Cartographic Lines Using Shortest-Path Formulations. *The Journal of the Operational Research Society*, **42**(9), 793–802.
- Chen, D., Daescu, O., Hershberger, J., Kogge, P., Mi, N., & Snoeyink, J. 2005. Polygonal path simplification with angle constraints. *Computational Geometry: Theory and Applications*, **32**(3), 173–187.
- de Berg, M., van Kreveld, M., & Schirra, S. 1998. Topologically correct subdivision simplification using the bandwidth criterion. *Cartography and Geographic Information Systems*, **25**(4), 243–257.
- Deveau, T. 1985. Reducing the number of points in a plane curve representation. *Pages 152–160 of: Proceedings of Auto-Carto VII, Washington D.C., USA.*
- Gudmundsson, J., G.Narasimhan, & Smid, M. 2007. Distance-preserving approximations of polygonal paths. *Computational Geometry: Theory and Applications*, **36**(3), 183–196.
- Hake, G., Grünreich, D., & Meng, L. 2002. *Kartographie*. Walter de Gruyter.
- Hauert, J.-H., & Wolff, A. 2008. Optimal simplification of building ground plans. *In: Proceedings of the XXIst ISPRS Congress , vol. XXXVII(Part B2) , Beijing, China.*

- Jarre, F., & Stoer, J. 2004. *Optimierung*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Kada, M., & Luo, Fen. 2006. Generalisation of Building Ground Plans using Half-Spaces. *In: Proceedings of the International Symposium on Geospatial Databases for Sustainable Development, Goa, India, ISPRS Technical Commission IV*.
- Mayer, H. 1998. Model-Generalization of Building Outlines Based on Scale-Spaces and Scale-Space Events. *Pages 530–536 of: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 32 (3/1).
- Meyer, U. 1989. *Generalisierung der Siedlungsdarstellung in digitalen Situationsmodellen*. Ph.D. thesis, Technische Universität Hannover, Germany.
- Rainsford, D., & Mackaness, W.A. 2002. Template matching in support of generalisation of rural buildings. *Pages pp.137–152 of: Richardson, D., & v. Oosterom, P. (eds), Advances in spatial data handling, 10th international symposium on spatial data handling*.
- Sester, M. 2005. Optimization approaches for generalization and data abstraction. *International Journal of Geographical Information Science*, **19**(8–9), 871–897.
- Staufenbiel, W. 1973. *Zur Automation der Generalisierung topographischer Karten mit besonderer Berücksichtigung großmaßstäbiger Gebäudedarstellungen*. Ph.D. thesis, Technische Universität Hannover, Germany.

# Selbstständigkeitserklärung

Ich versichere, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.

Hannover, den 24. September 2008