

Evaluierung generalisierter Gebäudegrundrisse in großen Maßstäben

Von der Fakultät Luft- und Raumfahrttechnik und Geodäsie
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktors
der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Yevgeniya Filippovska
aus Torez, Ukraine

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Dieter Fritsch
Mitberichter: Prof. Eur.-Ing. Dipl.-Geol. Dr. phil. habil.
Manfred F. Buchroithner

Tag der mündlichen Prüfung: 12. September 2012

Institut für Photogrammetrie
der Universität Stuttgart
2012

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Zusammenfassung	5
Summary	6
1 Einleitung	7
1.1. Motivation	7
1.2. Zielsetzung	8
1.3. Aufbau der Arbeit.....	9
2 Grundlagen der Qualitätsbewertung	11
2.1. Normung von Geodaten	11
2.1.1. Qualitätskonzepte	12
2.1.2. Qualitätskriterien, Ermittlung, Berichtserstattung	13
2.2. Qualität der digitalen Generalisierung	15
2.2.1. Digitale kartographische Generalisierung.....	16
2.2.2. Evaluierung der Generalisierungsergebnisse	18
2.2.3. Automatische einschränkungs-basierte Generalisierung und Qualitätsbewertung	19
2.2.4. Einschränkungen zur Objektgruppierung.....	22
2.2.5. Kontextuelle Generalisierung.....	23
3 Untersuchung der menschlichen Wahrnehmung	25
3.1. Aufbau des Wahrnehmungstests	25
3.2. Testergebnisse	29
3.2.1. Auswertung der einzelnen Modelle.....	29
3.2.2. Zusammenfassende Auswertung.....	31
4 Ähnlichkeitsbewertung	35
4.1. Ähnlichkeit und Wahrnehmung	35
4.1.1. Grundlagen der Ähnlichkeitsbestimmung.....	37
4.1.2. Normierung der Ähnlichkeitsmaße	38
4.1.3. Merkmalsvektoren und Distanzen.....	39
4.2. Klassifizierung der Objektmerkmale	41
4.2.1. Objektrepräsentationen.....	42
4.2.2. Berechnungsarten der Objektmerkmale	43
5 Qualitätsbewertung der Generalisierung	46
5.1. Existierende Ansätze	46
5.1.1. Einschränkungs-basierte Evaluierung im Rahmen von EuroSDR	46
5.1.2. Holistische Ansätze zur Qualitätsbewertung der Generalisierung.....	48
5.2. Besonderheiten beim Vergleich von Gebäudegrundrissen	51
5.2.1. Form (Turning-Funktion).....	51
5.2.2. Position.....	54
5.2.3. Orientierung	56
6 Konturbezogene Charakteristiken	60
6.1. Maximale Distanz zwischen zwei Konturen.....	60
6.1.1. Unzulänglichkeiten der originalen Hausdorff-Distanz (Probleme bei der Berechnung der Maximaldistanz).....	63

6.1.2. Modifizierte Hausdorff-Distanz	65
6.1.3. Originale vs. modifizierte Hausdorff-Distanz	66
6.1.4. Maximaler Abstand unter Beachtung konkaver Elemente	68
6.1.5. Komplexität eines gelöschten Elements	70
6.2. Konturüberlappung	73
6.2.1. Bezug auf originale oder generalisierte Kontur	77
6.2.2. Normalisierung der Konturüberlappung	80
7 Flächenbezogene Charakteristiken	82
7.1. Flächenveränderung	82
7.2. Qualitätsforderungen bezüglich der Flächenveränderung	84
7.3. Normalisierung der Flächencharakteristiken	85
8 Umsetzung der entwickelten Qualitätscharakteristiken	89
8.1. Evaluation auf der Mikroebene	89
8.1.1. Evaluierung eines generalisierten Objekts	89
8.1.2. Vergleich alternativer Generalisierungen eines Objekts	93
8.2. Evaluation auf der Makroebene	98
8.2.1. Evaluierung eines generalisierten Datensatzes	101
8.2.2. Vergleich alternativer Generalisierungen eines Datensatzes	111
9 Diskussion und Ausblick	117
Literaturverzeichnis	121
Anhang A. Distanz-Funktionen	127
Anhang B. Geometrische Merkmale	128
B.1 Formbasierte Charakteristiken	128
B.1.1 Formfaktor	128
B.1.2 Füllungsgrad	129
B.1.3 Ausdehnung	130
B.2 Statistisch berechnete Merkmale	130
B.2.1 Geometrische Momente	130
B.2.2 Zentrale Momente	132
B.2.3 Abgeleitete Eigenschaften	133
B.3 Distanzen	134
B.3.1 Hausdorff-Distanz	135
B.3.2 Flächenvergleich	135
B.4 Funktionaler Vergleich	136
B.4.1 Konturbezogene Signaturen	136
B.4.2 Signatur einer Region	137
Anhang C. Berechnung von zentralen Momenten	139
Anhang D. Originale und generalisierten Grundrisse mit Nummerierung	140
Anhang E. Qualitätscharakteristiken der generalisierten Grundrisse	141
Anhang F. Qualitätscharakteristiken der angepassten Grundrisse	146
Anhang G. Wahrnehmungstest	151
Lebenslauf	165

Zusammenfassung

Bei der Erzeugung von Karten werden die darzustellenden räumlichen Objekte in Abhängigkeit des angestrebten Maßstabs ausgewählt, verändert und so arrangiert, dass deren Form und Verteilung zu einem bestmöglichen Verständnis der räumlichen Gegebenheiten führt. Dabei weist die kartographische Abbildung unvermeidliche und zuweilen tiefgreifende geometrische Veränderungen im Vergleich zur Realität auf, welche durch eine übergeordnete Kontrollinstanz zu verifizieren und bewerten sind. Hierfür strebt man eine formalisierte Qualitätsbewertung der Ergebnisse an, so dass sich entsprechende Prozesse, bevorzugt mit Hilfe automatisierter Werkzeuge, umsetzen lassen.

Obwohl die Lesbarkeit der Gesamtkomposition einer Karte das Ziel ist, muss die Qualitätsbewertung zuerst auf der untersten Generalisierungsebene, der sogenannten Mikroebene erfolgen, indem die Geometrie- bzw. die Formveränderungen von Einzelobjekten bemessen werden. Neben dem Straßennetz dienen den Kartennutzern häufig vor allem markante Gebäude als Orientierungshilfe, welche aus diesem Grund nicht allzu großen Veränderungen unterliegen dürfen. Im Rahmen dieser Arbeit werden daher Qualitätscharakteristiken aufgezeigt, welche auf dem direkten Vergleich zweier Gebäudegrundrisse – Original und generalisiert – basieren.

Die vorliegende Arbeit beginnt mit einer theoretischen Einführung in das Thema der Qualität von Geodaten. Anschließend wird ein Wahrnehmungstest vorgestellt, welcher die Bewertung generalisierter Grundrisse durch menschliche Betrachter vornimmt. Versuche diese Wahrnehmungsprozesse mathematisch zu formalisieren wird als Ähnlichkeitsschätzung bezeichnet, deren Grundlagen darauffolgend dargelegt sind. In diesem Zusammenhang wird eine einheitliche Klassifizierung der Objektmerkmale basierend auf der zugrundeliegenden Berechnungsmethode vorgeschlagen. Ein Überblick über die bislang zur Qualitätsbewertung der Generalisierung gelaufenen Forschungsarbeiten und eine kritische Auseinandersetzung dazu runden den derzeitigen Kenntnisstand zum Themengebiet ab.

Daran anschließend werden neue Charakteristiken zur Ähnlichkeitsanalyse vorgestellt, welche die 2D-Gebäudeobjekte unter den Aspekten der Kontur- und Flächentreue hin vergleichen. Da eine Zuordnung zwischen den Formelementen allgemein nicht zweifelsfrei feststellbar ist, werden die Objekte geometrisch gemäß der Standardisierung von Geodaten als Punktmengen betrachtet. Dies erlaubt es, die geometrischen Berechnungen fast ausschließlich auf den Standardoperatoren der Mengentheorie aufzusetzen und mit den topologischen Algorithmen der Graphentheorie zu kombinieren. Zur Bewertung der Konturtreue werden Charakteristiken auf Basis der objektbildenden Randmengen aufgezeigt, welche Aufschluss über die maximale Abweichung und den Anteil der Überlappung gibt. Die Flächentreue wird unter einem quantitativen und einem räumlichen Aspekt betrachtet, wobei eine Differenzierung zwischen den Elementen der Strukturveränderungen vorgenommen wird.

Um die Aussagekraft und Praxistauglichkeit der vorgeschlagenen Charakteristiken zu überprüfen, wird eine Evaluierung von generalisierten Gebäudegrundrissen auf der Mikro- und Makroebene durchgeführt. Dabei spielt insbesondere auch die anschauliche Präsentation der Ergebnisse eine zentrale Rolle, so dass verschiedene Möglichkeiten zur Darstellung der einzelnen Charakteristiken bezüglich einer guten Diskriminierbarkeit der Qualitätsangaben im Fokus stehen. Die Analyse der Ergebnisse zeigt, dass alle vorgeschlagenen Charakteristiken aussagekräftig sind und eine vielseitige Beschreibung verschiedener Qualitätsaspekte der Generalisierung in deren Gesamtheit ermöglichen.

Summary

During map production, the map objects are chosen, modified and arranged in a way that their shapes and distribution lead to the best possible understanding of the spatial situation at the specified scale. As a result, the cartographic image underlies inevitable and sometimes profound changes in comparison to reality, which needs to be verified by means of a superior control instance. For this purpose, it is necessary to develop a formalized quality evaluation of the generalization results, so that the corresponding processes can be implemented with the help of automated tools.

Although the objective of the cartographic generalization is the readability of the whole composition, the quality evaluation must first take place at the lowest generalization level, the so called micro level, by measuring the geometry or shape changes of single objects. In conjunction with the road network, prominent buildings often serve as landmarks and should therefore not be significantly altered. In the scope of this work, quality characteristics are presented for 2D building information, which are respectively based on a direct comparison of two ground plans - original and generalized.

The thesis starts out with a theoretical introduction on the subject of geodata quality. Following, a perception test is presented, which aims to evaluate generalized ground plans by human viewers. Attempts to mathematically formalize the perception process are known as similarity measure. The basic principles are explained and a uniform classification of the object properties based on their computational method is proposed. An overview on the so far conducted research in this field and a critical discussion concludes the current state of knowledge regarding this topic.

Afterwards, new characteristics for the similarity analysis are presented that compare two 2D building objects with respect to their contours and areas. As the correspondences between the shape elements of the objects can generally not be determined unequivocally, the objects are geometrically considered as sets of points in accordance to the standardization of geodata. Thus, the geometric computations can be based almost exclusively on standard operators of set theory and combined with topological algorithms of graph theory. The evaluation of contour trueness between original and generalized ground plans includes the computation of the maximum deviation and the percentage of overlap. The trueness of area is estimated regarding both a quantitative and a spatial aspect and a differentiation of the elements of the structural changes is shown.

In order to prove the significance and practical suitability of the proposed contour and area characteristics, the evaluation of the generalized building ground plans are implemented at micro and macro level. As the comprehensive mapping of the outcomes particularly plays a central role, the focus lies on different possibilities to present each single characteristic with regard to a good discrimination of the quality information. The analysis of the obtained results of the quality evaluation shows that the introduced characteristics are significant and allows versatile description of the different quality aspects of generalization.

1 Einleitung

1.1. Motivation

Kartographische Abbildungen dienen zur Kommunikation räumlicher Daten, wobei die Informationsübertragung in Form von graphischen Darstellungen und deren visueller Wahrnehmung erfolgt. Aus diesem Grund spielt die Anschaulichkeit bei der Herstellung von Kartenwerken eine wesentliche Schlüsselrolle. Dies betrifft in erster Linie den Informationsumfang, welcher für die vorgesehene Zweckbestimmung entsprechend angepasst sein muss. Denn eine kartographische Abbildung mit zu hoher Informationsdichte erschwert die Verständlichkeit, wodurch die Karte für den menschlichen Betrachter an Nutzen verliert. Solch eine Situation kommt typischerweise beim Übergang von großen zu kleineren Maßstäben vor. Um die graphische Informationsdichte zu reduzieren, kommt die kartographische Generalisierung zum Einsatz, welche die Formoptimierung von Objekten und deren bestmögliche Verteilung auf der Karte zum Ziel hat. Früher wurde die Generalisierung hauptsächlich für die Herstellung von Maßstabsreihen amtlicher Kartenwerke eingesetzt. Aber auch nach dem Übergang hin zu digitalen Datenformaten und der Entwicklung von interaktiven Internetdiensten ist diese Aufgabe so aktuell wie noch nie, wobei der Anwendungsbereich dabei sogar noch breiter geworden ist. Die Generalisierung wird somit zur Reduzierung des Datenumfanges verwendet, was die Beschleunigung der Datenübertragung insbesondere im interaktiven Betrieb ermöglicht. Außerdem nimmt die Generalisierung einen zentralen Platz bei der Visualisierung kartenähnlicher Produkte, wie 3D-Stadtmodelle, virtuelle Globen und Navigationskarten ein, deren Präsentation oftmals am Bildschirm eines mobilen Geräts erfolgt und eine immer größere Verbreitung in der modernen Welt erfährt. Die Automatisierung räumlicher Analysen, zu denen auch der Generalisierungsprozess gehört, ermöglicht es, große Datenmengen schnell und effizient zu bearbeiten. Dennoch bleibt die Entwicklung von Werkzeugen zur Kontrolle und der Bewertung der Analyseergebnisse hinsichtlich der Datenqualität oftmals zurück, ein Umstand der vielleicht auch durch die hohe Komplexität der Thematik erklärt werden kann.

Der Generalisierungsprozess lässt sich kaum formalisieren und ist nur durch abstrakte Operatoren beschrieben, welche keine exakten Forderungen an das Ergebnis stellen. Aus diesem Grund stellt jeder individuelle Algorithmus eine eigene Interpretation der Generalisierungsvorgänge dar. Die dabei entstehenden geometrischen Veränderungen an den Objekten lassen sich unter verschiedenen Aspekten betrachten, da oftmals nicht alle Merkmale einer Entität gleichzeitig erhalten werden können. Auf diese Weise sind für ein und dasselbe Objekt mehrere verschiedene Generalisierungen möglich, was zur Folge hat, dass bei den einzelnen Generalisierungsvorgängen bestimmte Eigenschaften eines Objekts priorisiert werden können, während andere vernachlässigt werden. Somit ist die Evaluierung der unterschiedlichen Generalisierungsergebnisse notwendig, bei der der Veränderungsgrad eines Objektes quantitativ beurteilt und hinsichtlich einer bestimmten Anwendung qualitativ interpretiert werden kann.

Für herkömmliche Papierkartenwerke werden sowohl die Genauigkeit als auch der Detaillierungsgrad eines Objektes durch die graphische Mindestgröße definiert, welche ein Schwellwert der Sichtbarkeit darstellt. Sie steht im direkten Zusammenhang mit dem Kartenmaßstab. Bei digitalen Daten werden jedoch die Koordinaten nicht mehr graphisch definiert, infolgedessen es gilt zwischen dem Detaillierungsgrad der Informationen innerhalb einer Datenbank und dem Maßstab der Visualisierung zu unterscheiden. Was die Genauigkeit der Generalisierung anbelangt, ist die Koordinatengenauigkeit nicht so gut für deren Charakterisierung geeignet. Das liegt daran, dass infolge der Generalisierung sowohl Punkte eines Objektes gelöscht als auch neue

hinzugefügt werden, welche in der Realität nicht existieren. Aus diesem Grund müssen Charakteristiken entwickelt werden, die anschaulich und in Übereinstimmung mit der Wahrnehmung eines menschlichen Betrachters die geometrischen Unterschiede zwischen den originalen und generalisierten Objekten reflektieren.

Bei der Evaluierung generalisierter Objekte sind die Besonderheiten der konkret betrachteten Objektklasse zu berücksichtigen. Somit ist zwischen natürlichen und anthropogenen Objekten zu unterscheiden, welche über unterschiedliche Eigenschaften verfügen. Da Gebäudegrundrisse einen wesentlichen Teil der Geobasisdaten ausmachen, insbesondere für städtische Gebiete, widmet sich die vorliegende Arbeit speziell diesem Objekttyp. Wenngleich 3D-Daten im zunehmenden Maße erfasst werden, stellen die 2D-Gebäudegrundrisse für die meisten Datensätze noch immer den vorherrschenden Typ dar. Und 3D-Gebäudemodelle lassen sich auch immer auf deren Grundrisse zurückführen. Aus diesen Gründen ist es sinnvoll, das Problem der Evaluierung generalisierter Gebäudegeometrien erst einmal für den zweidimensionalen Fall umfassend zu untersuchen.

Es existiert nur eine geringe Anzahl von Arbeiten, die sich mit der Evaluierung von Ergebnissen der kartografischen Generalisierung befassen. Die meisten existierenden Ansätze betrachten die geometrischen Veränderungen der Gebäudegrundrisse sehr allgemein, lediglich als Teil des Generalisierungsprozesses einer gesamten Karte. Dabei werden eher die globalen Charakteristiken, wie Rechtwinkligkeit oder die Veränderung in der Ausdehnung und Konkavität eines Objektes geschätzt, während die einzelnen Aspekte der lokalen Veränderungen hinsichtlich der Objektkontur oder Fläche unbeachtet bleiben. Diese sind jedoch insbesondere bei der Generalisierung in großen Maßstäben von großem Interesse, bei der Form eines Objektes zwar vereinfacht wird, diese jedoch sehr gut erkennbar sein soll. Gerade der Entwicklung von Charakteristiken zur Beurteilung von lokalen Unterschieden zwischen den generalisierten und deren originalen Gebäudegrundrisse widmet sich die vorliegende Forschungsarbeit.

1.2. Zielsetzung

Das Thema der Geodatenqualität ist sehr komplex und umfassend und stellt seit langem aufgrund seiner großen Bedeutung ein wichtigen Aspekt für die Normung dar. Somit ist es wichtig, dass der Untersuchung spezieller Qualitätsaspekte übergeordneter Konzepte zugrunde gelegt werden. Zu diesem Zweck muss die Geodatenqualität zuerst allgemein betrachtet werden. Da in der Normenentwicklung viele Organisationen teilnehmen, welche auf verschiedenen Niveaus agieren und unterschiedliche Rollen bei diesem Prozess spielen, muss als Erstes die Struktur der internationalen Normung in Betracht gezogen werden. Anschließend wird der Inhalt der themenrelevanten Normen hinsichtlich der grundlegenden Qualitätsmerkmale, sowie deren Berechnung und Dokumentierung untersucht. Daran anschließend muss die Qualität speziell hinsichtlich der Evaluierung der Generalisierungslösungen betrachtet werden.

Bei der Qualitätsbewertung der Generalisierung werden die generalisierten Objekte mit deren Originalen verglichen. Die wenigen existierenden Ansätze zur Qualitätsbewertung der Generalisierung verwenden in den meisten Fällen die Charakteristiken ohne diese zu begründen oder deren Entstehung zu erläutern. Aus diesem Grund ist es nötig herauszufinden, welche Ähnlichkeitscharakteristiken für den Vergleich zweier Objekte überhaupt existieren und wie diese zur Qualitätsbewertung der Generalisierung verwendet werden können. Dabei ist wichtig zu wissen, welche Änderungen eines Objektes infolge der Generalisierung überhaupt stattfinden und wie diese angemessen klassifiziert werden können. Erst aufgrund dieser Informationen kann die Eig-

nung der einen oder anderen Charakteristik für die Qualitätsbewertung der Objekte einer bestimmten Klasse beurteilt werden. Ein weiteres wichtiges Thema stellt die Aggregation der Qualitätscharakteristiken dar, deren Grundlagen auch untersucht werden müssen.

In erster Linie ist diese Forschungsarbeit auf die großmaßstäbigen kartographischen Objektpräsentationen (1:500-1:5.000) ausgerichtet. Hier findet die Generalisierung auf der Objektebene statt, so dass die Wirkung der Aggregationsoperatoren vernachlässigt werden kann. Dabei wird die Form eines Objektes zwar vereinfacht, sie ist jedoch immer noch gut erkennbar. Das Endziel dieser Arbeit besteht darin, Qualitätsparameter für die Bewertung generalisierter Gebäudegrundrisse unter Berücksichtigung der Besonderheiten dieses speziellen Datentyps zu entwickeln, um darauf basierend auch einen Vergleich von alternativen Generalisierungsergebnissen zu ermöglichen. Darüber hinaus muss die Übereinstimmung der vorgeschlagenen Qualitätsparameter mit der menschlichen Wahrnehmung der Generalisierung festgestellt werden.

1.3. Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist wie folgt aufgebaut. Im zweiten Kapitel wird ein umfassender Überblick über die Qualität von Geodaten gegeben. Hier werden sowohl der Verlauf des Normungsverfahrens, als auch die Inhalte themenrelevanter Normen hinsichtlich existierender Qualitätskonzepte untersucht. Weiter werden die Besonderheiten von Geodaten und deren Evaluierung hinsichtlich der Qualität diskutiert, welche durch den Übergang vom analogen zum digitalen Datenformat bedingt sind. Hierzu werden die Grundlagen der Qualitätsbewertung speziell für die kartografische Generalisierung, wie in der relevanten Literatur beschrieben, gegeben.

Kapitel 3 stellt den Versuch dar, eine Nutzerbefragung für die Qualitätsbewertung generalisierter Grundrisse zu realisieren. Daraus werden Empfehlungen für die geometrischen Eigenschaften von Generalisierungsoperatoren ausgesprochen. Auf diese Weise dient diese Untersuchung zur Betonung der Rolle menschlicher Wahrnehmung für die Ähnlichkeitsschätzung zwischen Objekten. Demzufolge wird im anschließenden vierten Kapitel die Ähnlichkeit zweier Objekte aus dem Blickwinkel der Psychologie definiert und die darauf basierenden mathematische Grundlagen zu deren Beurteilung gegeben. Danach wird die Klassifizierung existierender Ähnlichkeitsmaße u.a. aus dem Bereich von Bildverarbeitung diskutiert und eine neue Klassifizierung vorgeschlagen, welche eine klare und eindeutige Strukturierung aller Merkmale zur Ähnlichkeitsbewertung ermöglicht.

Das fünfte Kapitel widmet sich unmittelbar der Qualitätsbewertung der Generalisierung. Nach einer allgemeinen Darstellung zum Thema existierender Arbeiten werden die darin vorgeschlagenen Techniken tiefgreifend analysiert und deren tatsächliche Eignung für die Bewertung generalisierter Gebäudegrundrisse erläutert. An Beispielen werden die Limitierungen dieser Verfahren aufgedeckt, diskutiert und die Motivation für die nachfolgenden Kapitel gegeben.

Die beiden darauffolgenden Kapitel 6 und 7 präsentieren kontur- und flächentreue Charakteristiken, welche im Rahmen dieser Arbeit speziell für den Vergleich der geometrischen Ähnlichkeit von originalen und simplifizierten Grundrisspolygonen ausgearbeitet wurden. Dabei wird für jede einzelne quantitative Charakteristik die Umwandlung in ein Qualitätsmaß ausführlich diskutiert. Beispiele zur Umsetzung der vorgeschlagenen Charakteristiken sind in Kapitel 8 zu sehen. Hier wird die Evaluierung generalisierter Gebäudegrundrisse sowohl aus der Mikroebene (für Einzelobjekte) als auch auf der Makroebene (für große Datensätze) betrachtet. Im Fokus dieses

Kapitels stehen u.a. Fragen, welche die Aggregation von Qualitätscharakteristiken und die anschauliche Repräsentation von Ergebnissen der Qualitätsanalyse betreffen.

Das letzte Kapitel fasst die vorliegende Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf mögliche zukünftige Untersuchungsfelder. Im Anhang werden die Ergebnisse der Qualitätsbewertung der betrachteten Beispieldatensätze sowie die Aufgabenstellung des Wahrnehmungstest wiedergegeben. Darüber hinaus werden die in der Computervision existierenden Charakteristiken vorgestellt, die zur quantitativen Beschreibung der Eigenschaften eines Objekts dienen und als Grundlage zum Vergleich der Erscheinung zweier Objekte eingesetzt werden können.

2 Grundlagen der Qualitätsbewertung

In diesem Kapitel werden die allgemeinen Grundlagen für das Verständnis der vorliegenden Arbeit geschaffen. Zuerst werden die Bedeutung und die Ziele internationaler Normungsbestrebungen erläutert und anhand dessen eine allgemeine Definition für die Qualität eingeführt. Darüber hinaus werden der Normeninhalt bezüglich der Klassifizierung der Qualitätscharakteristiken, sowie deren Berechnung und Dokumentation zusammengefasst. Daran anschließend wird insbesondere das Problem der automatischen Generalisierung betrachtet, deren Qualitätsbewertung im Fokus dieser Arbeit steht. Hier werden verschiedene Aspekte der Generalisierungsprozesse vorgestellt, sowie die Herausforderungen bei der Evaluierung der Generalisierungsergebnisse diskutiert.

2.1. Normung von Geodaten

Die heutige Zeit ist durch rasante Entwicklungen in den Informationstechnologien gekennzeichnet, wobei viele Systeme unterschiedlich konzipiert sind und eigene Datenformate benutzen. Aus diesem Grund spielen heutzutage Begriffe wie Interoperabilität und Kompatibilität eine tragende Schlüsselrolle. Zur Gewährleistung eines zuverlässigen und effizienten Funktionalitäts- und Informationsaustauschs, sowie der Qualitätssicherung dienen Standardisierungs- und Normungsverfahren.

Der für geographische Informationen und Geomatik zuständige Fachbereich der Internationalen Organisation für Normung ist das technische Komitee ISO/TC 211. Daneben gibt es kooperierende internationale Organisationen, die einen wirkungsvollen Beitrag in der Normenentwicklung leisten. Dazu gehören unter anderem das Open Geospatial Consortium (OGC), die International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) und die International Cartographic Association (ICA). Auf europäischer Ebene tragen u.a. das European Spatial Data Research Network (EuroSDR) und die EuroGeographics einen unmittelbaren Beitrag zum Normungsprozess bei. Da die internationalen Normen sehr allgemein formuliert sind, erfolgt deren Umsetzung auf der nationalen Ebene, in Deutschland durch das Deutsche Institut für Normung (DIN).

Für die Erarbeitung des Qualitätsmodells und die Entwicklung des Qualitätssicherungssystems für Geodaten des amtlichen Vermessungswesens ist die Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) zuständig. Die unmittelbare Qualitätskontrolle wird durch die Landesvermessungsämter sowie das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BGK) durchgeführt. Die Interessen der Geoinformatik werden insbesondere durch den Deutschen Dachverband für Geoinformation (DDGI) vertreten, welcher die Verwendung von Geoinformationen anhand von Standardisierung der Qualität und der Inhalte von Geodaten fördert. Das DDGI-Qualitätsmodell DIN PAS 1071 (2007) stellt eine verkürzte und auf die praktische Anwendung gerichtete Normenzusammenfassung bezüglich der Datenqualität dar und gibt die dem deutschen Sprachgebrauch entsprechenden Übersetzungen der Fachbegriffe an. Dabei handelt es sich um ISO 19101 und ISO 19113-19115, deren Inhalt ausführlich im Abschnitt 2.1.2 diskutiert wird.

2.1.1. Qualitätskonzepte

Laut DIN EN ISO 9000: 2005, welche die Grundlage für die Normenserie bezüglich des Qualitätsmanagements bildet, wird Qualität als „Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale Anforderungen erfüllt“ definiert (DIN PAS 1071, 2007). Anders ausgedrückt, inwieweit die Charakteristiken eines Produktes, das eine Ware oder Dienstleistung sein kann, den vorausgesetzten Erfordernissen entspricht. Im Geomatik-Bereich ist die Beurteilung der Datenqualität ein äußerst komplexes Thema, wobei zwei unterschiedliche Konzepte in Betracht gezogen werden. Diese repräsentieren zwei Blickwinkel auf Geodaten und sind deswegen für verschiedene Zielgruppen, nämlich für den Datenhersteller und den Datennutzer, von Interesse (Devillers et al., 2005; Devillers and Jeansoulin, 2006; Salehi et al., 2007).

Aus der Sicht eines Datenherstellers ist die Korrektheit, Vollständigkeit und Widerspruchsfreiheit bzw. Konsistenz eines Datensatzes von äußerster Bedeutung, welches als interne Qualität bezeichnet werden kann. Zu diesem Zweck wird die Übereinstimmung zwischen den Daten und deren Spezifikation geprüft, die den Informationsumfang, die Darstellungsarten der Geometrie und die inhaltlichen Angaben festlegt. Auf diese Weise stellt die Spezifikation einen Übergang von der realen Welt, oder genauer gesagt von einem bestimmten Teil davon, das als Diskursuniversum (engl. „universe of discourse“) bezeichnet wird, zu einer konkreten Implementierung dar, wobei die Konsistenz eines Datensatzes gewährleistet wird. Innerhalb einer Datenbank kann die Entstehung von logischen Widersprüchen durch die Einführung von speziellen Regeln bzw. Integritätseinschränkungen verhindert werden. Diese lassen sich allgemein in drei Gruppen einordnen, nämlich Verwaltungsregeln für Geometrie, Einschränkungen für Attributgrößen (Thematik) und räumliche Beziehungen (Topologie) in Abhängigkeit von der Semantik der Objekte (Salehi et al., 2007; Servigne et al., 2006; Vallières et al., 2006). Beispielsweise werden die topologischen Relationen zwischen den Objekten, wie „Straßen dürfen Wasserobjekte nur über Brücken überqueren“ oder „Inseln müssen von Wasserobjekten komplett umschlossen sein“, durch räumliche Integritätseinschränkungen bestimmt (Vallières et al., 2006).

Von der Seite des Datennutzers, dem die technischen Details bezüglich der Herstellung und Weiterführung eines Datensatzes oftmals nicht bekannt sind oder sich für diese auch nicht interessiert, und der von einer hundertprozentigen Datenzuverlässigkeit ausgeht, ist vor allem die Anwendungstauglichkeit der Informationen wichtig. Dieses Konzept hat die Bezeichnung „externe Qualität“ oder „fitness for use“, erhalten. Hier wird eher untersucht, inwiefern der Datensatz den bestimmten Nutzerbedürfnissen entspricht. D.h. die externe Qualität wird immer in einem Kontext betrachtet und ein und dieselben Daten können gleichzeitig für eine Anwendung „akzeptabel“ und für einen anderen Zweck „unbrauchbar“ sein. Dementsprechend ist die Qualitätseinstufung eines Datensatzes in „geeignet“ oder „nicht geeignet“ für eine bestimmte Anwendung erwünscht, oder auch „am besten geeignet“, wenn es sich um die Wahl aus mehreren Alternativen handelt (DIN PAS 1071, 2007).

Dennoch sind diese zwei oben beschriebenen Konzepte unmittelbar miteinander verbunden, wobei die Definition der externen Qualität umfangreicher ist und die Beurteilung der internen Qualität als Teil der Eignungsanalyse eines Datensatzes in Hinblick auf eine bestimmte Nutzung benötigt. Diese Zuordnung ist in der Abbildung 2.1 zusammengefasst.

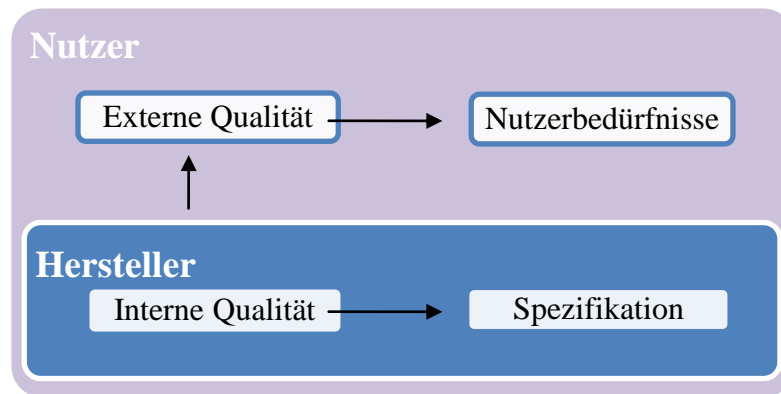


Abbildung 2.1: Zusammenhang zwischen interner und externer Qualität

Die externe Qualität lässt sich kaum formalisieren und muss für jeden einzelnen Fall speziell betrachtet werden. Im Gegensatz dazu stellt die interne Qualität eine objektive Beurteilung von Eigenschaften eines Datensatzes dar und unterliegt relativ problemlos dem Normungsverfahren. Eine umfassende Diskussion bezüglich der Qualitätskomponente, deren Normung, sowie Dokumentation als Metadaten ist in (Servigne et al., 2006) gegeben. Diese Aspekte werden im nächsten Abschnitt detailliert betrachtet.

2.1.2. Qualitätskriterien, Ermittlung, Berichtserstattung

Der Definition, Beschreibung und Verwaltung geographischer Informationen widmet sich die Normenserie ISO 19100, die durch ISO/TC 211 (siehe Abschnitt 2.1) erarbeitet und weiterentwickelt wird. Als geographische Informationen werden hier Daten von Objekten oder Phänomenen angesehen, die sich direkt oder indirekt auf eine Position relativ zur Erde beziehen. Neben der Erarbeitung eines Referenzmodells spielt im Rahmen dieser Normenserie die Unterstützung der Interoperabilität zwischen den geographischen Informationssystemen eine große Rolle, deren Aspekte in einzelnen Normen erläutert sind.

Zur Förderung der gemeinsamen Datennutzung und des Datenaustauschs, sowie der Wahl des zu einem bestimmten Zweck am besten geeigneten Datensatzes werden in ISO 19113 (2002) die Grundprinzipien der Qualitätsbeschreibung eingeführt. Diese besteht aus zwei Komponenten, die als beschreibende und qualitative Elemente oder Merkmale bezeichnet werden. Die beschreibenden Merkmale geben solche Informationen über den Datensatz an, wie dessen Quelle und die Schritte des Erfassungsprozesses als Komponenten (von engl. „lineage“), sowie geplante und tatsächliche bisherige Verwendung (engl. „purpose“ bzw. „usage“). Die fünf quantitativen Qualitätselemente unterteilen sich weiter in fünfzehn Subelemente, die jeweils einen bestimmten Aspekt eines Qualitätselements zum Ausdruck bringen. Die gesamten Qualitätselemente gemeinsam mit den entsprechenden Subelementen sind in Tabelle 2.1 aufgelistet.

Qualitätselemente, Subelemente und deren Deskriptoren bilden die Grundlage zur Beschreibung der internen Datenqualität. Die Deskriptoren enthalten solche Informationen, wie den Geltungsbereich der Qualitätsangabe (engl. „data quality scope“, z.B. deren geographische und zeitliche Erstreckung), Qualitätsmaße (engl. „quality measure“), deren Ermittlungsverfahren (engl. „quality evaluation procedure“) und Qualitätsangabe (engl. „quality result“), sowie dessen Typ, Einheit und Berechnungsdatum. Diese sind in einer weiteren Norm ISO 19114 (2003) spezifiziert.

Elemente zur Angabe der Datenqualität	Subelemente zur Angabe der Datenqualität
Beschreibende Merkmale	
Abstammung	Zweck, Verwendung, Abstammung (Herstellungsprozess)
Quantitative Merkmale	
Vollständigkeit	Mangel Überschuss
Logische Konsistenz	Konzeptuelle Konsistenz Domänen-Konsistenz Format-Konsistenz Topologische Konsistenz
Positionsgenauigkeit	Absolute oder äußere Genauigkeit Relative oder interne Genauigkeit Gittergenauigkeit
Thematische Genauigkeit	Korrektheit thematischer Klassifizierung Genauigkeit nicht quantitativer Attribute Genauigkeit quantitativer Attribute
Zeitliche Genauigkeit	Genauigkeit zeitlicher Messungen Zeitliche Konsistenz Zeitliche Gültigkeitsdauer

Tabelle 2.1: Qualitätscharakteristiken nach ISO 19113

Bei der Qualitätsermittlung kann man zwischen den direkten und indirekten Verfahren unterscheiden. Die letztgenannten basieren auf den externen Kenntnissen, wie die beschreibenden Merkmale oder andere Qualitätsberichte. Die direkten Verfahren können sich ausschließlich auf den Datensatz beziehen und werden in dem Fall als interne Verfahren bezeichnet, während die externen Verfahren den Vergleich zu einem Referenzdatensatz implizieren. Die alternativen Berechnungsmethoden für jedes Qualitätssubelement, die in Abhängigkeit von einem Datensatz und dessen Verwendungszweck ausgewählt sein können, sind in (ISO 19114, 2003; ISO 19138, 2006) angegeben. Zuletzt wird die Qualitätsangabe auf die Übereinstimmung mit der Produktspezifikation oder den Nutzeranforderungen überprüft, was aufgrund von der Qualitätsgrenzlage (engl. "conformance quality level") bzw. mittels vordefinierten Schwellwerten erfolgt. Somit wird aufgrund dieses sogenannten Pass/Fail-Tests die externe Qualität des Datensatzes bewertet.

Die über die Qualität eines Datensatzes erhaltenen Informationen werden in Form von Metadaten dokumentiert. Die Einzelheiten zur Berichterstattung der Datenqualität (engl. "reporting quality information") sind in ISO 19115 (2003) festgelegt, dessen spätere Berichtigungen in ISO 19115/Cor.1 (2006) veröffentlicht sind. Auf diese Weise wird der minimal notwendige Metadatenatz definiert, der das volle Spektrum der Metadatenanwendungen abdeckt. Die Struktur von Metadaten, die aus sechzehn thematischen Bereichen (engl. "metadata sections") besteht, ist anhand von UML-Diagrammen (engl. "Unified Modeling Language") mit den entsprechenden Wörterbüchern modelliert, wobei jeder Metadatenbereich als ein UML-Paket (engl. "package") dargestellt wird.

Die einzelnen Aspekte eines Metadatenbereiches werden durch die Einheiten (engl. "metadata entities") beschrieben, die als ein Satz von Metadatenelementen spezifiziert sind. Grundsätzlich ist zwischen den obligatorischen, bedingten (wenn zumindest eine Einheit oder ein Element obligatorisch ist) und optionalen Metadateneinheiten und -elementen zu unterscheiden. Da die Metadaten sehr allgemein definiert sind, ist es möglich diese durch die eigenen anwendungsab-

hängigen Informationen zu erweitern. Die Ergänzung zu dieser Norm, insbesondere für die Bild- und Rasterdaten, ist in ISO 19115-2 (2009) veröffentlicht. Letztendlich werden die auf XML (engl. „Extensible Markup Language“) basierenden Kodierungsregeln für die UML-Schemata in ISO/TS 19139 (2007) spezifiziert.

2.2. Qualität der digitalen Generalisierung

Unter dem Begriff des Maßstabs im herkömmlichen kartographischen Sinn, auch als metrischer Maßstab bezeichnet, wird das Verhältnis zwischen der in einer Karte abgebildeten Strecke und deren Entsprechung in der Realität verstanden. Demzufolge können die Objekte in einer Karte desto realitätsgetreuer abgebildet werden, je größer der Maßstab ist. Mit kleiner werdendem Maßstab steigt hingegen der Abstraktionsgrad der Objekte, was bei Papierkartenwerken mit einem direkten Zusammenhang zwischen den beiden ausgedrückt werden kann. Ist z.B. eine Strecke in einem Maßstab für den menschlichen Betrachter nicht mehr gut erkennbar, so wird diese oftmals weggelassen oder, wenn sie Teil eines Objekts ist, das Objekt dermaßen verändert, dass keine zu kurzen Strecken mehr darin auftreten. Dieser Prozess wird als kartographische Generalisierung bezeichnet und hat zum Ziel die Übersichtlichkeit einer Karte zu verbessern.

Die Kenngröße, welche zum Ausdruck bringt unter welchen Ausmaßen die Elemente in einer Karte wie Strecken, Flächen oder Abstände zwischen den Objekten in einem bestimmten Maßstab nicht mehr gut erkennbar sind, wird als graphische Mindestgröße bezeichnet und ist vom menschlichen Sehvermögen abgeleitet (Hake et al., 2002; Lechthaler, 2007; Stadler and Lechthaler, 2006). Somit können die Objektelemente, die kleiner als dieser Schwellwert sind durch einen menschlichen Betrachter kaum mehr erkannt und gemessen werden und brauchen dementsprechend auf einer Karte nicht wiedergegeben werden. Auf diese Weise bestimmt der kartographische Maßstab den Inhalt von Papierkartenwerken, den Detaillierungsgrad der darin enthaltenen Objekte und auch die Genauigkeit der kartographischen Arbeiten, die auf der Karte durchgeführt werden können. Die funktionale Abhängigkeit dieser Charakteristiken vom Maßstab ist in der Regel durch Standards zur Kartenerstellung vorgeschrieben.

Die Generierung von Karten in verschiedenen Maßstäben ist eine der bedeutendsten Aufgaben der Kartografie, die bei weitem nicht trivial ist. Obgleich dieser Prozess sich wesentlich mit dem Übergang von den Papierkartenwerken zu den digitalen Datenträgern verändert hat, bleibt die Datentransformation von den großen zu den kleineren Maßstäben auch heutzutage sehr anspruchsvoll. Dessen Bedeutung hat sich sogar erweitert, da z.B. mobile und interaktive Produkte einen relativ neuen und sich rasch entwickelnden Markt darstellen, der zusätzliche Anforderungen an die Präsentation von geographischen Daten stellt.

Die digitale Generalisierung kann in zwei Arten unterteilt werden, die als Folge der Automatisierung dieses Prozesses entstanden sind. Diese sind die kartographische und die modellorientierte Generalisierung. Die kartographische Generalisierung betrifft im Speziellen die Visualisierung der Geodaten und findet auf dem graphischen Niveau statt. Im Gegensatz dazu wird die modellorientierte Generalisierung im Rahmen der internen Repräsentation einer Karte durchgeführt und hat die Reduzierung der Informationendichte innerhalb einer Datenbank zum Ziel. Solch eine Datenprozessierung kann auch als Vorverarbeitung für die kartographische Generalisierung betrachtet werden, da eine kartographische Abbildung die Visualisierung der inneren Datenrepräsentation darstellt (Cheng, 2001; Dettori and Puppo, 1998; Han-Sze-Chuen et al., 2002). Jedenfalls muss eine solche Abbildung in Übereinstimmung mit den Gestaltregeln nachgebessert werden. Die vorliegende Arbeit befasst sich ausschließlich mit der kartographischen Generalisierung

und der Evaluierung der geometrischen Veränderungen, die infolge dieses Prozesses entstehen können.

2.2.1. Digitale kartographische Generalisierung

Genau wie bei den Papierkartenwerken wird der digitale Generalisierungsprozess durch die Forderung nach Lesbarkeit der kartographischen Abbildung ausgelöst. Wird die Informationsdichte auf einer Karte zu hoch, so sind die wichtigen Aspekte schwer wahrzunehmen. Anstatt bei der Entscheidungsfindung hilfreich zu sein, verwirren solche Karten und werden damit nutzlos. Daraus folgend hat die Generalisierung zum Ziel, eine Überflutung mit Informationen zu vermeiden, was durch Reduzierung des Detaillierungsgrades erfolgt. Somit hat die Lesbarkeit den Vorrang vor der geometrischen Genauigkeit, wobei die Erscheinung der Objekte nach Möglichkeit erhalten bleiben soll. Diese zwei wichtigsten Generalisierungsaspekte stehen im Konflikt zueinander, der auf unterschiedliche Weise gelöst werden kann. Dabei wird in Abhängigkeit von der Anwendung und Objektart die eine oder die andere Lösung bevorzugt.

Während in den Zeiten von Papierkartenwerken die Generalisierung einen eher künstlerischen Prozess darstellte, dessen Qualität von der Erfahrung und Kreativität der Fachleute abhängig war, werden heute immer mehr Ansätze zur automatisierten Lösung dieses Problems entwickelt. Dabei besteht die größte Schwierigkeit darin die Generalisierungsvorgänge zu formalisieren. Denn sie basieren auf menschlichen Kenntnissen und der Wahrnehmung eines jeden Einzelnen und implizieren dadurch eine umfassende Analyse vielfältiger Faktoren. Formal können diese daher nur als abstrakte Operatoren beschrieben werden (Foerster et al., 2008; Harrie and Weibel, 2007). Die Vorgänge können sich auf einzelne Objekte, Objektgruppen oder sogar auf die ganze Karte beziehen. Die Beschreibung klassischer Generalisierungsoperatoren, die für Papierkartenwerke eingesetzt wurden, ist z.B. in (Hake et al., 2002) gegeben. Eine überarbeitete und erweiterte Aufzählung generischer Operatoren, die unter Berücksichtigung der Besonderheiten des digitalen Datenformats entstand, wird in (Regnauld and McMaster, 2007) vorgestellt. Hier werden die spezifischen Generalisierungsoperatoren für solche Objekttypen wie Gebäudegrundrisse, linienhafte (Straßen, Flüsse) und ländliche (Felder, Wälder) Objekte, sowie Relief ausführlich diskutiert. Bezüglich der Gebäudegrundrisse wird insbesondere auf solche Aspekte wie die Reduzierung der Objektanzahl und Erhaltung der Relationen innerhalb von Gebäudegruppen, sowie auf die Gewährleistung der Lesbarkeit für einzelne Objekte eingegangen. Eine weitere Zusammenfassung der in der digitalen Generalisierung verwendeten Operatoren wird in (Li, 2007) gegeben.

Auf der Implementierungsebene stellt jedoch jeder individuelle Algorithmus eine eigene Interpretation der Generalisierungsvorgänge dar, wodurch unterschiedliche Ergebnisse generiert werden können. Bspw. ist die Simplifizierung der einzelnen Gebäudegrundrisse aufgrund der Eliminierung von zu kurzen Kanten mit anschließender Anpassung an das Original mittels der Methode der kleinsten Quadrate in (Sester, 2000b) präsentiert. In (Hunert and Wolff, 2008) erfolgt die Simplifizierung einer Gebäudekontur anhand der sogenannten „shortcut“-Technik aus der Graphentheorie, welche die optimale Minimierung der Kantenanzahl innerhalb eines benutzer-vorgegebenen Toleranzbereichs darstellt. Dieser Ansatz wird in (Hunert and Wolff, 2010) auch für größere Datensätze bestehend aus einzelnen Gebäudegrundrissen erweitert. Ein weiterer Operator ist die Verdrängung, welche die Position der Objekte verlagert, um räumliche Konflikte wie Überlappungen innerhalb einer Objektgruppe zu lösen. Diese wird in (Daoud and Doytsher, 2008) mithilfe eines pseudo-physikalischen Modells implementiert. Es basiert auf der Theorie des elektrischen Feldes, wobei die Wichtigkeit eines Grundrisses durch die Größe seiner effekti-

ven Hülle (engl. „effective shell“) definiert wird. Diese bestimmt die Wechselwirkung der Objekte und deren gegenseitiges Verhalten unter dem Einfluss verschiedener Kräfte innerhalb der effektiven Hülle. Eine Lösung für die Verdrängung hinsichtlich des Zusammenspiels zwischen den Gebäudegrundrissen und dem Straßennetz wird in (Sester, 2000a) betrachtet. Dieser Ansatz basiert auf Informationen über die Nachbarschaft von Objekten, die aus einer Delaunay-Triangulation abgeleitet werden, wobei die Verdrängung unter der Bedingung der flexiblen oder fixierten Position des Straßennetzes durchgeführt werden kann. Ein umfassender Überblick über die konkreten Implementierungen aller existierender Operatoren der digitalen Generalisierung ist in (Regnauld and McMaster, 2007), sowie in (Li, 2007) gegeben.

Auch im Bereich der Simplifizierung von 3D-Gebäudemodellen gibt es sehr verschiedenartige Ansätze. So wird z.B. in (Thiemann and Sester, 2006) mit vordefinierten Vorlagen operiert, welche vereinfachte Modelle für unterschiedliche Gebäudetypen darstellen. Für jedes konkrete Objekt wird eine Vorlage ausgesucht, die strukturell und topologisch am ähnlichsten dem Original entspricht. Mithilfe der Methode der kleinsten Quadrate werden die Ausmaße dieser Vorlage an das Objekt optimal angepasst. Dabei wird die Fläche eines Objekts durch zufällig verteilte Punkte diskretisiert, um die Korrespondenzen zwischen dem originalen und vereinfachten Objekt aufgrund der kleinsten Distanzen zwischen diesen Approximationspunkten und den Flächen des anderen Objekts festzustellen. In der Arbeit von Kada (2007) werden die Gebäudemodelle anhand einer Zellenzerlegung simplifiziert. Hier werden zunächst die dominanten Fassadenflächen gefunden und anhand derer durch Verschneidung eines Grundblocks 2,5D-Zellen generiert. Nach der Identifikation der Zellen, die zum Gebäude gehören, und der Rekonstruktion der Dachform, werden diese räumlichen Zellen, ähnlich wie nach dem Prinzip des Baukastens, zu einem ganzheitlichen 3D-Gebäudemodell zusammengefasst. Ein anderer Ansatz für die Generalisierung von Gebäudegrundrissen mithilfe morphologischer Operatoren, der auch für die Verarbeitung von 3D-Gebäudemodellen erweitert wurde, wird in (Mayer, 2005) und (Forberg, 2007) vorgeschlagen. Die Hauptidee besteht darin, dass parallele Flächen solange zueinander bewegt werden, bis hervorstehende Elemente eliminiert oder Lücken in den Fassadenlinien geschlossen werden. Auf diese Weise entstehen vereinfachte Modelle, die anschließend zur Erfüllung der Bedingung der Rechtwinkligkeit angepasst werden. Die Herausforderungen der Objektmodellierung und Generalisierung von Gebäuden in 3D werden vertieft in (Meng and Forberg, 2007) erörtert.

Diese Beispiele für Generalisierungsansätze illustrieren, was für unterschiedliche Konzepte hinter der Implementierung eines jeden einzelnen Operators stehen können. Die Anzahl der alternativen Lösungen wird noch größer, wenn mehrere Operatoren im Laufe des Generalisierungsprozesses kombiniert werden, was ziemlich oft vorkommt. Auch die Reihenfolge, in der die Operatoren verwendet werden, spielt eine große Rolle. Der Ablauf der Generalisierungsmaßnahmen bei der Vereinfachung eines Gebäudegrundrisses in Abhängigkeit vom Elementtyp (siehe Kapitel 3) ist in (Staufenbiel, 1973) gegeben. Die in (Neun et al., 2009) vorgestellte Arbeit widmet sich dem Thema der Auswahl der Generalisierungsoperatoren und der optimalen Reihenfolge für deren Ausführung, wobei unterschiedliche Optimierungsmethoden wie Bergsteigeralgorithmus (engl. „hill climbing“), simuliertes Kristallwachstum/Abkühlung (engl. „simulated annealing“) und genetische Tiefensuche (engl. „genetic deep search“) betrachtet werden.

Mit der immer schneller werdenden Entwicklung von Web-Diensten, die auch das Anbieten von Generalisierungsfunktionalitäten betrifft, ist das Problem der Interoperabilität zwischen unterschiedlichen Systemen entstanden. Dieses Thema, sowie eine mögliche Lösung dafür, wird in (Foerster et al., 2008) ausführlich diskutiert. Dabei wird eine eindeutige Klassifizierung der existierenden Generalisierungsoperatoren nach deren Verwendungszweck (Herstellung eines Daten-

satzes vs. einer Karte) vorgeschlagen, was der modellorientierten und kartographischen Generalisierung entspricht (siehe Abschnitt 2.2). Diese zwei Gruppen werden anhand des ISO 19109-Modells (ISO, 2003) und Go-1 Application Object Modells (OGC, 2005) entsprechend definiert, während die Generalisierungsoperatoren mithilfe von OCL (engl. „Object Constraint Language“) formalisiert werden. Als Beispiel wurde dieser Ansatz für die Formalisierung des Douglas-Peucker Algorithmus eingesetzt. Die standardisierte einheitliche Formalisierung der Generalisierungsoperatoren soll zur Gewährleistung von Interoperabilitäten im Rahmen der heterogenen Web-Umgebung dienen und den weiteren Fortschritt der automatisierten Generalisierung unterstützen, was die Notwendigkeit einer tiefergehenden Forschung in diesem Gebiet bedingt.

Die Vielfalt an Lösungen, die aufgrund der verschiedenen Implementierungen entstehen und die über unterschiedliche Eigenschaften verfügen, benötigt eine Evaluierung, um die Angemessenheit einer jeden konkreten Lösung für den einen oder den anderen Zweck einschätzen zu können. Die unterschiedlichen Blickwinkel, unter denen das Thema betrachtet werden kann, werden im nächsten Abschnitt eingehend dargelegt.

2.2.2. Evaluierung der Generalisierungsergebnisse

Erst die Automatisierung des Generalisierungsprozesses ermöglicht die schnelle Transformation großer Datensätze. Informationen über die daraus erhaltenen Ergebnisse sind dennoch oftmals nicht enthalten. Während viele Forschungsarbeiten sich unmittelbar dem Generalisierungsproblem widmen, bleibt die Entwicklung automatisierter Evaluierungsmethoden noch immer etwas zurück. Diese Tatsache kann durch die hohe Komplexität der Aufgabe erklärt werden, deren Lösung viele Faktoren in Betracht ziehen muss, so wie es ein menschlicher Experte tun müsste, dessen Auffassung einer räumlichen Situation von der persönlichen Erfahrung und Wahrnehmung abhängig ist. Dabei wird eher das Gesamtbild als Ganzes empfunden, als lediglich die einzelnen Aspekte, was sehr schwierig zu simulieren ist.

Dagegen steigt das Bedürfnis nach einer automatisierten Evaluierung der Generalisierungsergebnissen immer weiter an, wobei deren Vorteile offensichtlich sind. Neben der erheblichen Reduzierung des zeitlichen Aufwandes und der Kosten können die nach der Evaluierung erhaltenen Informationen gleichzeitig eine Doppelrolle spielen. Einerseits lassen diese die Ausmaße der Objektänderungen infolge der Generalisierung beurteilen und stellen dadurch eine Grundlage für die Herstellung von Metadaten für einen Datensatz dar. Andererseits ermöglichen diese deskriptiven Informationen die allgemeinen Fehler eines Algorithmus aufzudecken, was für die Verbesserung des Generalisierungsprozesses selbst verwendet werden kann. Somit entsteht eine Art von Rückkopplung zwischen dem Ergebnis und dem System (Burghardt et al., 2008). Die Evaluierungsergebnisse können sowohl zum Vergleich alternativer Generalisierungslösungen, als auch zum Vergleich verschiedener Generalisierungsalgorithmen dienen (Mackaness and Ruas, 2007).

Die Evaluierung der Generalisierungsergebnisse kann unterschiedlichen Zwecken dienen, was die Komplexität der nötigen Auswertungen bedingt. Dementsprechend unterscheidet die Arbeit von Bard and Ruas (2004) zwischen drei Evaluierungsvorsätzen: Evaluierung hinsichtlich der Bearbeitung (engl. „evaluation for editing“) prüft auf das Vorhandensein von Fehlern, die deskriptive Evaluierung (engl. „deskriptive evaluation“) beabsichtigt, die Reduzierung und Verzerrungen der Informationen zu quantifizieren, und die Evaluierung hinsichtlich der Kennzeichnung (engl. „evaluation for marking“) aggregiert die deskriptiven Messungen zu einem Gesamtwert, der eine bestimmte Lösung insgesamt bewertet. Später wurde diese Klassifizierung von (Mackaness and Ruas, 2007) erweitert. Somit werden diese drei Evaluierungsklassen der Eva-

luierung hinsichtlich der Bewertung übergeordnet, die nach der Generalisierung stattfindet. Dabei wird die Evaluierung hinsichtlich der Kennzeichnung als Evaluierung hinsichtlich der Einstufung (engl. „evaluation for ranking“) umbenannt, was damit zu tun hat, dass aufgrund des einzigen Gesamtwertes die alternativen Generalisierungslösungen miteinander verglichen und gemäß der Qualität eingestuft werden können. Die anderen zwei übergeordneten Klassen heißen Evaluierung hinsichtlich der Einstellung (engl. „evaluation for tuning“), wobei die am besten passenden Parameterwerte zur Vorgabe für den Generalisierungsvorgang festgestellt werden, und die Evaluierung hinsichtlich der Kontrolle (engl. „evaluation for controlling“), die im Laufe der Generalisierung durchgeführt wird, da die Endlösung oftmals infolge der iterativen Verbesserungen erhalten wird.

Die Evaluierung kann auf unterschiedlichen Detaillierungsniveaus erfolgen, wobei man dann entsprechend der Ebene von der Mikro-, Meso- und Makroevaluierung spricht (Bard and Ruas, 2004; Mackaness and Ruas, 2007). Auf diese Weise werden auf der Mikroebene die einzelnen Objekte miteinander verglichen, wobei einem Original ein generalisiertes Objekt eindeutig zugeordnet wird (1-1 Relation). Die Mesoevaluierungen betreffen eine Gruppe von Objekten, deren Anzahl nach der Generalisierung reduziert sein kann. Dementsprechend handelt es sich in diesem Fall um die n - m Relation, wobei n und m relativ kleine Zahlen sind. Bei großen Werten von n und m spricht man hingegen von der Makroevaluation, welche die Unterschiede zwischen ganzen Datensätzen misst. Das Ziel dieser Evaluierung besteht in erster Linie darin, die allgemeinen quantitativen Veränderungen innerhalb einer Karte, wie die Objektanzahl, deren Längen oder Flächen, vor und nach der Generalisierung festzustellen. Somit kommt der Makroevaluierung auch eine wichtige Rolle bei der Kontrolle beim Übergang zwischen der Mikro- und Mesoebene zu, wobei die Erhaltung der Größenordnung von solch qualitativen Charakteristiken wie die Informationsdichte oder die relative Größe der resultierenden Objekte und deren Originale überprüft wird.

Auf diese Weise kann die Qualität der Generalisierung als Veränderungsgrad der Objekte betrachtet werden. Die quantitative Schätzung dieser Veränderungen erfolgt anhand von Messungen, die zunächst objektive Kennzahlen darstellen und einen generalisierten Datensatz anwendungsunabhängig charakterisieren. Dies entspricht dem Konzept der inneren Qualität, welche im Abschnitt 2.1.1 beschrieben ist. Für die Bestimmung der externen Qualität, welche die Eignung der erhaltenen Ergebnisse für einen bestimmten Verwendungszweck reflektiert, können die Nutzerbedürfnisse in Form von Schwellwerten für diese Messungen vorgegeben werden. Somit wird die Zulässigkeitsgrenze für die vorhandenen Messwerte bestimmt, was der einschränkungsbasierten Evaluierung entspricht. Dieses Konzept hat eine weite Verbreitung bekommen und wird im nächsten Abschnitt ausführlich besprochen.

Aufgrund von Schwellwerten können die numerischen Messwerte weiter qualitativ interpretiert werden und in diskrete Qualitätsklassen unterteilt werden (Bard and Ruas, 2004; Burghardt et al., 2008; Devillers et al., 2007).

2.2.3. Automatische einschränkungsbasierte Generalisierung und Qualitätsbewertung

Die Vielfältigkeit der Generalisierungsansätze bedingt die Notwendigkeit hin zu einem übergreifenden Konzept für die Automatisierung des Generalisierungsprozesses. Dies soll hauptsächlich die Verwendung des einen oder anderen Algorithmus in jedem konkreten Fall reglementieren. Die Ausarbeitung solch eines Konzepts ist durch die Entwicklung von drei verschiedenen Vor-

gehensweisen gekennzeichnet, die jeweils aus sich heraus entstanden sind und chronologisch einander abgelöst haben (Foerster et al., 2008; Harrie and Weibel, 2007).

Die erste Vorgehensweise ist als Bedingungs-Handlungs-Modellierung (engl. „condition-action modelling“) bekannt. Hier wird eine Menge von Regeln aufgestellt, deren Erfüllung in Form von Bedingungen geprüft und das entsprechende Vorgehen für die Generalisierung ausgelöst wird. Die nächste Vorgehensweise impliziert die menschliche Interaktion (engl. „human interaction model“), wobei die komplizierte Datenanalyse, sowie die darauffolgenden Generalisierungsvorschläge durch das System durchgeführt und berechnet werden, was als Entscheidungsgrundlage für einen menschlichen Benutzer dient. Das letzte Konzept ist einschränkungs-basiert (engl. „constraint-based modelling“) und operiert ähnlich wie bei der Bedingungs-Handlungs-Modellierung mit Regeln. Hier steht jedoch nicht die Handlung (wie wird etwas gemacht), sondern das Ergebnis (was muss erzielt werden) im Fokus. Dies erlaubt eine größere Flexibilität beim Erreichen des Ziels, was insbesondere wichtig ist, wenn die Erfüllung einiger Bedingungen im Konflikt zueinander stehen kann und eine optimale Kompromisslösung gesucht wird.

Wie im vorherigen Abschnitt erwähnt wurde, können auch die Präferenzen eines Nutzers in Form von Regeln formuliert werden, die den Kreis der möglichen Generalisierungslösungen einschränkt. Auf diese Weise stellen die kartographischen Einschränkungen gewisse Bedingungen dar, die eine kartographische Abbildung erfüllen muss, unabhängig davon wie sie generiert wurde. Diese können ihrerseits als Leitfaden sowohl für den Generalisierungsprozess, als auch für die Evaluierung der endgültigen Ergebnisse eingesetzt werden. In Übereinstimmung mit den zwei oben erklärten treibenden Generalisierungsprinzipien ist zwischen den auf die Lesbarkeit (engl. „legibility constraints“) und auf die äußere Erscheinung (engl. „appearance“) der Objekte bezogenen Einschränkungen zu unterscheiden (Burghardt et al., 2007). Die darin vorgeschlagene Klassifizierung der kartographischen Einschränkungen ist Abbildung 2.2 zu entnehmen. Die Einschränkungen der Lesbarkeit wird durch die Mindestgrößen (engl. „minimal dimensions“) bzw. die Schwellwerte vorgegeben, die nicht überschritten werden dürfen. Somit kann diese Bedingung einfach überprüft werden, wobei ein Objekt oder Objektteil, das diese Einschränkung nicht erfüllt, entweder gelöscht oder betont werden muss. Diese Entscheidung erfolgt aufgrund der semantischen Bedeutung dieses Objekts oder Objektteils, die dessen Wichtigkeit in jedem bestimmten Fall definiert.

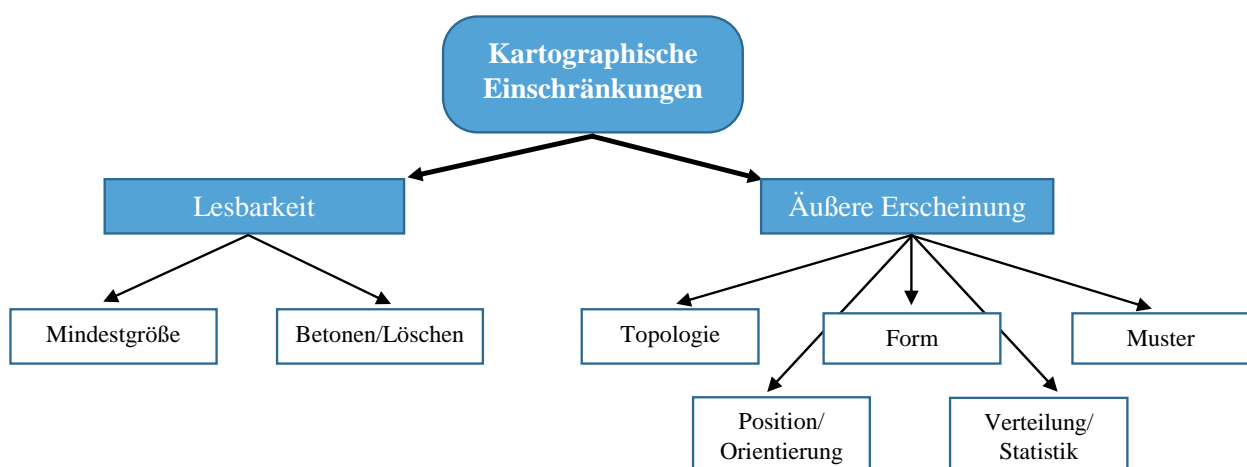


Abbildung 2.2: Klassifizierung kartographischer Einschränkungen, nach (Burghardt et al., 2007)

Was die Erscheinung eines Objekts angeht, erfolgt die Verifikation dieser Bedingung aufgrund des Vergleichs der generalisierten Objekte mit deren Originalen oder Referenzen. Solche Einschränkungen sind deutlich schwerer zu formalisieren, da die äußere Ähnlichkeit zwischen den

Objekten nicht immer eindeutig definiert werden kann. Einerseits können dieselben geometrischen Eigenschaften eines Objekts unterschiedlich geschätzt werden. Daher ist es wichtig, die sinnvollsten Charakteristiken aus dieser Menge zu wählen. Andererseits können nicht alle Eigenschaften gleichzeitig erhalten bleiben. Dementsprechend muss ganz klar definiert werden, welche Merkmale in jedem konkreten Fall von Interesse sind.

Aus der relevanten Literatur sind mehrere Klassifizierungen kartographischer Einschränkungen bekannt. Eine verbreitete Klassifizierung wurde im Rahmen des AGENT-Projekts entwickelt. Demgemäß unterteilen sich die Erscheinungseinschränkungen bezüglich Position, Topologie und Form der Objekte, sowie die strukturelle und funktionale Einschränkungen (Harrie and Weibel, 2007). Laut einer anderen Typologie (vgl. Abbildung 2.2) betreffen die Erscheinungseinschränkungen Aspekte der kartographischen Informationen wie Topologie, Position/Orientierung, Form, Muster und Verteilung/Statistik (Burghardt et al., 2007). Diese Klassifizierung ist für diese Arbeit besonders interessant, da sie speziell für die Evaluierung der Generalisierungsergebnisse entwickelt wurde. Die topologischen Einschränkungen gewährleisten die innere Konsistenz eines generalisierten Datensatzes. Durch die Bedingungen bezüglich der Position und Orientierung wird die Translation und Rotation eines Objekts kontrolliert, während der zulässige Grad dessen Verzerrung durch Formeinschränkungen zum Ausdruck gebracht werden. Die Mustereinschränkungen betreffen ein höheres Konzept, wobei mehrere Objekte in Betracht gezogen werden, um die existierenden Muster aufzudecken und nach der Generalisierung beizubehalten (siehe nächster Abschnitt). Die Einschränkungen „Verteilung/Statistik“ reflektieren die globalen Effekte der Generalisierung wie die Einschränkungen bezüglich der Objektdichte. Dies kann z.B. als das Verhältnis zwischen Schwarz und Weiß auf einer Karte (Burghardt et al., 2007) geschätzt werden. Noch ein komplexerer objektorientierter Ansatz zur Schätzung der Objektdichte, das auf der aus der Delaunay-Triangulation abgeleiteten Raumskelettierung basiert, wird in (Xiang et al., 2008) vorgestellt. Im Vergleich zu der AGENT-Klassifizierung werden dort die Bedingungen bezüglich der durch die Objekte gebildeten Muster und der Objekteverteilung als strukturelle Einschränkungen zusammengefasst. Dabei fehlt hier die Gruppe der funktionalen Einschränkungen, welche die Eignung einer generalisierten Karte zu den bestimmten Zwecken gewährleisten.

Nach dem Toleranzgrad der Verletzung unterscheidet man zwischen den harten und weichen Einschränkungen. Die harten Einschränkungen stellen eine klar definierte Bedingung dar, die entweder komplett erfüllt oder nicht erfüllt sein kann bzw. zu einem binären Ergebnis führt. Dazu gehört üblicherweise das Beibehalten von Mindestgrößen oder topologischen Einschränkungen (Burghardt et al., 2007). Z.B. muss ein Haus nach der Generalisierung an der gleichen Straßenseite verblieben sein (Steiniger and Weibel, 2007). Im Gegensatz dazu wird bei den weichen Einschränkungen deren Verletzung zu einem bestimmten Grad toleriert.

Eine weitere Unterteilung der kartographischen Einschränkungen bezieht sich auf deren Formalisierungsgrad. Bspw. kann die Einschränkung für die Objektform sehr abstrakt formuliert werden und lauten, dass die Form eines Objekts nach der Generalisierung ähnlich bleiben muss. Auf der Implementierungsebene muss diese Einschränkung detaillierter definiert werden, wobei die konkreten Messungen, wie z.B. die Konkavität oder das Seitenverhältnis, festgelegt werden müssen (Burghardt et al., 2008).

Eine umfassende Forschungsarbeit bezüglich der existierenden kartographischen Einschränkungen nationaler Vermessungsbehörden und der Evaluierungsmöglichkeiten der Generalisierungsergebnisse aufgrund dieser Einschränkungen wurde im Rahmen eines EuroSDR-Projekts durchgeführt, deren endgültige Ergebnisse in (Stoter et al., 2009) präsentiert sind (siehe Abschnitt 5.1.1). Dennoch kann die automatisierte, einschränkungs-basierte Evaluierung hauptsächlich für

die Lesbarkeitsbedingungen bzw. basierend auf den Mindestgrößen durchgeführt werden. Die Bedingungen zur Erhaltung des Erscheinungsbildes ihrerseits sind sehr schwer zu formalisieren, da die Idealgröße oftmals unbekannt ist (Burghardt et al., 2008). Die existierenden Lösungen zu diesem Problem werden im Abschnitt 5.1 diskutiert. Dies betrifft insbesondere die Objektform und ist dadurch bedingt, dass jeder Objekttyp über eigene spezifische Eigenschaften bzw. Spezifika verfügt. Um die am besten geeigneten Charakteristiken für eine bestimmte Objektart zu identifizieren, muss diese tiefgreifend untersucht werden. Auch der Maßstab spielt eine große Rolle, denn er bestimmt die überwiegende Art der Objektveränderung. Auf diese Weise fehlen oftmals die Spezifikationen für den Formvergleich der Mehrfachrepräsentationen eines Objekts.

Somit ist es notwendig festzustellen, welche Änderungen eines Objekts überhaupt stattfinden und wie diese angemessen klassifiziert werden können. Erst aufgrund dieser Informationen können die spezifizierten Einschränkungen für die Generalisierung der Objekte einer bestimmten Klasse aufgestellt werden. In (Foerster et al., 2010) werden bspw. die typischen Objektveränderungen aufgrund der am häufigsten verwendeten Generalisierungsoperatoren untersucht. Hier werden zuerst die aktuellen Tendenzen der automatisierten Generalisierung als qualitative Analyse betrachtet. Die quantitative Analyse basiert auf den Daten von vier nationalen Vermessungsbehörden und besteht darin, die Wichtigkeit von Generalisierungsoperatoren für verschiedene Objekttypen in Abhängigkeit von der Maßstabsänderung, sowie die Wichtigkeit jedes Objekttyps selbst zu schätzen. Dabei handelt es sich um die drei Maßstabsübergänge 1:10.000-1:50.000, 1:50.000-1:100.000, 1:50.000-1:250.000. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Relevanz von modellorientierten Operatoren mit kleiner werdendem Maßstab steigt, jedoch nie das Niveau von den kartographischen Operatoren erreicht. Als für diese Maßstäbe am wichtigsten haben sich die Netzwerk-Objekte wie Flüsse, Eisenbahn und Straßen in Kombination mit solchen Operatoren wie Betonung, Typisierung und Eliminierung erwiesen. Diese Arbeit kann als eine Erweiterung der im Rahmen von EuroSDR durchgeführten Forschungstätigkeit betrachtet werden, da diese Untersuchung sich nicht auf eine konkrete Generalisierungslösung beschränkt.

2.2.4. Einschränkungen zur Objektgruppierung

Einen besonderen Platz besitzen Einschränkungen, die auf den Gestaltprinzipien basieren. In diesem Konzept höherer Ordnung, welches sich mit der Formalisierung der menschlichen Wahrnehmung befasst (Lowe, 1986), werden existierende Strukturen innerhalb eines Datensatzes aufgespürt und ästhetische Aspekte der Generalisierung in Betracht gezogen. Auf diese Weise werden z.B. die einzelnen Gebäudegrundrisse in den städtischen Gebieten zu Gebäudeblöcken aggregiert, während in den Außenbezirken eher die Ausrichtung einzelner Gebäude entlang von Straßen betont wird (Steiniger et al., 2008). Hier handelt es sich um die perzeptive Objektgruppierung bzw. perzeptive Organisation, die eine direkte Auswirkung auf die Wahl des Generalisierungsvorgangs bei einem menschlichen Benutzer hat.

Die menschliche Wahrnehmung ist durch eine selektive visuelle Aufmerksamkeit gekennzeichnet. Dabei wird eine Szene zunächst als Ganzes erfasst und anschließend deren Objekte oder Objektgruppen detaillierter untersucht (Gonzaga et al., 1998). Diese zwei Wahrnehmungsphasen werden als präattentive und fokale Stufe (engl. „preattentive and focal stage“) bezeichnet. Ähnliche Wahrnehmungskonzepte werden in (Li et al., 2004) am Beispiel der Gruppierung von Gebäuden erläutert, deren Aufteilung gemäß der städtischen Morphologie (engl. „urban morphology“) erfolgt. Der Ansatz wird in (Qi and Li, 2008) durch die hierarchische Einbindung der lokaler Einschränkungen Dichte, Orientierung und Formähnlichkeit von Objekten fortgeführt.

Eine weitere Vorgehensweise zur automatischen Strukturerkennung von bebauten Gebieten wird in (Steiniger et al., 2008) diskutiert. Während die räumliche Abgrenzungen in den vorherigen Ansätzen auf Straßen- und Wasserobjekten basiert, erfolgt diese hier auf der unmittelbaren Klassifizierung des Objektmerkmalsraums. Aus diesem Grund stellt die Diskussion existierender Klassifikationsalgorithmen einen wichtigen Punkt der Arbeit dar, wobei sich die Dimensionalität der Merkmale mittels Hauptkomponentenanalyse reduzieren lässt.

Abschließend muss erwähnt werden, dass die Einschränkungen zur Objektgruppierung, sowie die menschliche Wahrnehmung von kartographischen Informationen ein sehr komplexes Gebiet darstellen, das weitere Forschungsarbeiten bedarf. Sie bilden die Grundlage für den nächsten Schritt in der Entwicklung automatisierter Generalisierungsansätze, die sogenannte kontextuelle Generalisierung.

2.2.5. Kontextuelle Generalisierung

Die meisten bisher existierenden Ansätze implementieren lediglich vereinzelte Operatoren, die unabhängig voneinander und innerhalb einer bestimmten Objektklasse angewendet werden (Steiniger and Weibel, 2007). Aus diesem Grund können diese Vorgänge noch nicht als Ersatz für den menschlichen Benutzer dienen, welcher die ganze Szene in ihrer Vollständigkeit und Komplexität wahrzunehmen und zu verarbeiten vermag. Demzufolge existiert ein gesteigerter Bedarf für ein verfeinertes Konzept, mit dem sich die kognitiven Fähigkeiten eines Menschen besser modellieren lassen. Dies wird auch als kontextuelle Generalisierung bezeichnet. Im Unterschied zur herkömmlichen Vorgehensweise werden hier die Objekte gemeinsam mit deren Umgebung in Betracht gezogen (Lecordix and Lemarié, 2007). Zu diesem Zweck wird hier zusätzlich das Konzept der Relationen eingeführt. Gemeinsam mit den Einschränkungen und Messungen dienen sie zur Modellierung der gegenseitigen Beziehungen zwischen den Objekten verschiedener Klassen. Der Zusammenhang zwischen diesen drei Begriffen wird in (Steiniger and Weibel, 2007) erläutert. Durch die aufgestellten Einschränkungen wird die Entwicklung von Relationen anhand entsprechender Messungen kontrolliert. Eine Klassifizierung von Relationen bestehend aus den folgenden drei Gruppen wird vorgeschlagen:

1. Horizontale Relationen beschreiben die Beziehungen zwischen den Objekten innerhalb einer Detaillierungsstufe, alternativ auch mit „intra-scale“ oder „intra-resolution“ bezeichnet. Dazu gehören bspw. die Nachbarschaftsbeziehungen und räumliche Muster.
2. Vertikale Relationen erzeugen den Zusammenhang zwischen den verschiedenen Detaillierungsniveaus eines Datensatzes („inter-scale“ oder „inter-resolution“).
3. Aktualisierungsrelationen spiegeln die zeitlichen Veränderungen eines Datensatzes wider (z.B. hinzugefügt, gelöscht, verändert).

Die letzten zwei Relationsarten bilden das Konzept, das den Mehrfachrepräsentationen-Datenbanken (MRDB, engl. „multiple representation databases“) zugrunde liegt.

In (Steiniger and Weibel, 2007) wird insbesondere auf die horizontalen Relationen eingegangen, wobei die vorgeschlagene Typologie aus fünf Klassen besteht, nämlich geometrische, topologische, statistische (Dichte), semantische und strukturelle Relationen. Jede dieser Gruppen wird durch weitere Subunterteilungen ausführlich diskutiert, wobei die existierenden Messungen bzw. Charakteristiken, wie sie in dieser Arbeit definiert sind, eingeführt und miteinander verglichen werden. Der Ansatz wurde am Beispiel natürlicher Objekte in kleinen Maßstäben gezeigt.

Zusammengefasst hat die kontextuelle Generalisierung zum Ziel, die typischen Strukturen und Muster auf einer Karte beizubehalten. Dabei wird der räumliche Kontext jedes Objekts berücksichtigt, um die gegenseitigen Beziehungen zwischen den Objekten der verschiedenen Klassen zu erkennen und nach der Generalisierung korrekt wiederzugeben.

Im Gegensatz dazu widmet sich die vorliegende Arbeit mit der Entwicklung von Spezifikationen, welche die Evaluierung einzelner Gebäudegrundrisse, d.h. auf der Mikroebene, ermöglicht. Es geht demzufolge um die großen Maßstäbe, bei denen vornehmlich die Generalisierungsoperatoren Simplifizierung und Betonung eingesetzt werden. Da der Verlauf und die Arbeitsweise eines Generalisierungsvorgangs oftmals unbekannt sind, interessiert in diesem Zusammenhang die Evaluierung hinsichtlich der Bewertung. Diese hat zum Ziel die erhaltenen Lösungen quantitativ und qualitativ zu beurteilen. Dazu gehören die Identifikation von Inkonsistenzen, die quantitative Evaluierung von Differenzen und die Einteilung alternativer Generalisierungslösungen in Qualitätsklassen.

3 Untersuchung der menschlichen Wahrnehmung

Ein wichtiges Problem, das heutzutage immer mehr in Betracht gezogen wird, besteht darin, dass die mathematisch berechneten Kenngrößen nur wenig oder überhaupt keine Relevanz zu der durch einen menschlichen Betrachter empfundenen Situation aufweisen können. Um diese Tatsache zu untersuchen, wurde speziell für die vorliegende Arbeit ein Wahrnehmungstest erarbeitet, dessen Ziel es ist, die vorgeschlagenen Qualitätscharakteristiken aus dem Blickwinkel der menschlichen Wahrnehmung zu überprüfen.

Im Folgenden besteht die Notwendigkeit zwischen den verschiedenen Strukturelementen eines Grundrisses zu unterscheiden. Bspw. werden die zu eliminierenden Elemente eines Grundrisses in (Sester, 2000a; Sester, 2000b) als Versatz (engl. „offset“), Ausbuchtung (engl. „intrusion/extrusion“) und Ecke (engl. „corner“) bezeichnet. Da in dieser Arbeit die beiden Begriffe Intrusion und Extrusion bei den flächenbezogenen Qualitätscharakteristiken Verwendung finden (siehe Abschnitt 7.1), wird die in (Staufenbiel, 1973) eingeführte und etwas detailliertere Klassifizierung von Grundrisselementen benutzt. Diese ist in Abbildung 3.1 illustriert und unterscheidet zwischen a) Seitenversprung, b) Vorbau bzw. Einsprung, c) Eckversprung und d) dessen Spezialfall: der doppelte Eckversprung.

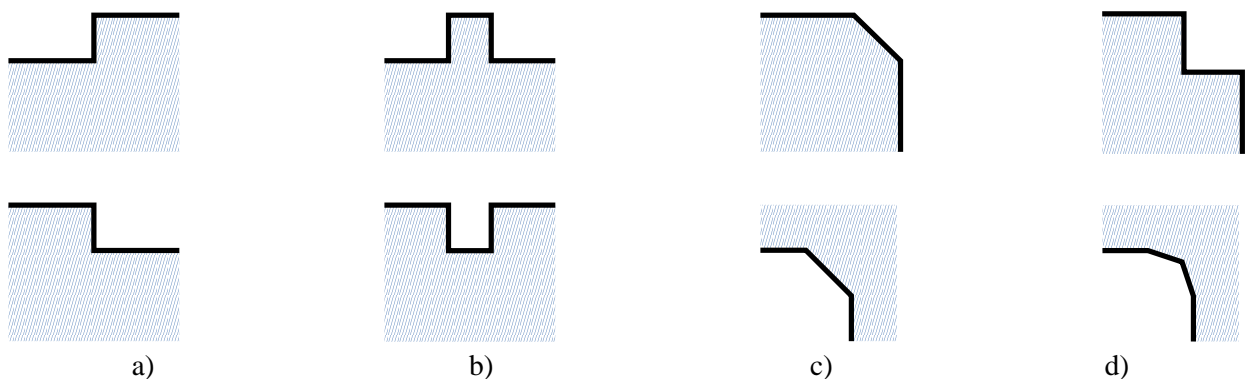


Abbildung 3.1: Grundrisselemente a) Seitenversprung, b) Vorsprung (oben) und Einsprung (unten), c) Eckversprung, d) doppelter Eckversprung

Im Folgenden werden diese Bezeichnungen für die Identifizierung der Strukturelemente eines Grundrisses übernommen. Bis auf Vorbau, welcher in Analogie mit Einsprung hier als Vorsprung bezeichnet wird. Dabei ist es wichtig zu beachten, dass die vereinfachten Elemente als eliminiert bezeichnet werden, wobei dies unabhängig davon erfolgt, ob die Fläche reduziert oder zu einem Grundriss hinzugefügt wird, entsprechend der Eliminierung von Vor- oder Einsprung.

3.1. Aufbau des Wahrnehmungstests

Der Test besteht aus drei unterschiedlich ausgestalteten Teilen, um die Aspekte der menschlichen Wahrnehmung vielseitig zu untersuchen. In den ersten zwei Teilen werden lediglich einfache synthetische Beispiele vorgelegt, die auf den grundlegenden architektonischen Elementen eines Gebäudegrundrisses, nämlich Vor-, Ein- und Eckversprünge basieren (siehe Abbildung 3.1). Für jedes Objekt, deren Elemente jeweils in der Tiefe und Breite variiert wurden, werden vier bzw. (bei Eckversprünge) fünf Generalisierungsalternativen dargeboten, die bewertet werden müssen. Dabei wird jeder Variante einer Zeile eine eindeutige Platzierung vergeben, wobei der erste Platz der besten Lösung entspricht.

Im ersten Teil sind die Grundrisse überlagert, sodass die Unterschiede zwischen den beiden Objekten offensichtlich werden, wie Abbildung 3.2 a) zeigt. Im Gegensatz sind im zweiten Teil der originale Grundriss und dessen Generalisierungsalternativen nebeneinander abgebildet, sodass die Geometrie dieser Objekte allgemein verglichen werden kann (siehe Abbildung 3.2 b)).

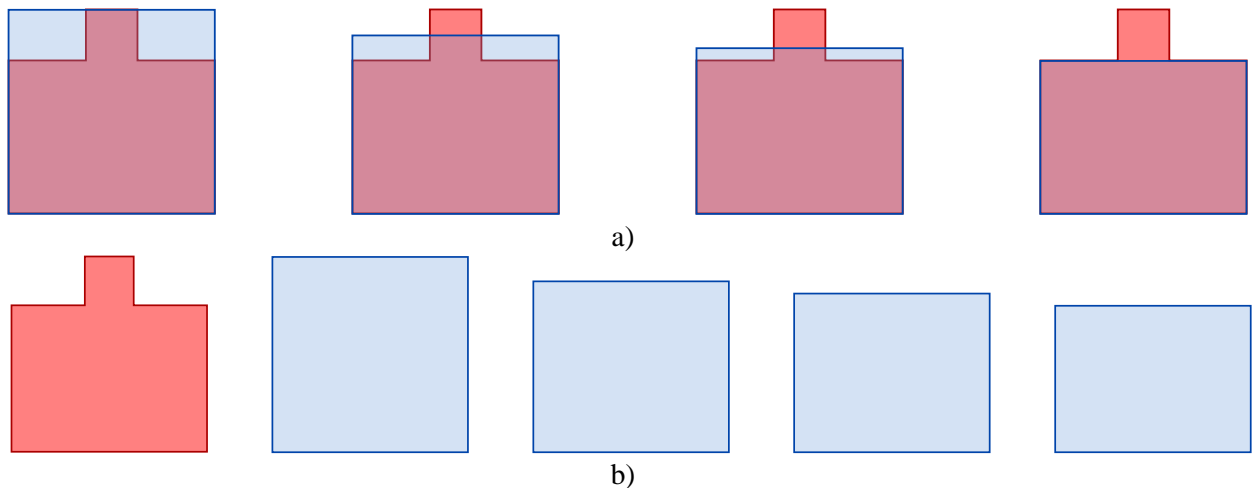


Abbildung 3.2: Generalisierungsalternativen

Als Generalisierungsalternativen werden grundsätzlich folgende Fälle betrachtet, die in Abbildung 3.2 von links nach rechts gezeigt sind: das originale Objekt ist vollständig in einem generalisierten Grundriss enthalten, die Generalisierungslinie verläuft genau in der Mitte des gelöschten Elements, nähert sich an die Fassadenlinie an oder überlagert diese. Die letzte alternative entspricht der kompletten Eliminierung des architektonischen Elements. Die entsprechenden Generalisierungsalternativen für Einsprünge werden in umgekehrter Reihenfolge in Abbildung 3.3 gezeigt. Um diese Regelmäßigkeiten etwas zu verbergen, wird die Reihenfolge der beschriebenen Alternativen verändert. Auch die Ähnlichkeitstransformationen der Grundrisse, wie Drehung und Spiegelung, werden zu diesem Zweck durchgeführt. Für die Kontrolle der Ergebnisse werden einige Grundrisse mehrmals im selben Teil des Tests eingeführt oder treten sogar in den beiden Teilen auf (vgl. Abbildung 3.2 a) und b)).

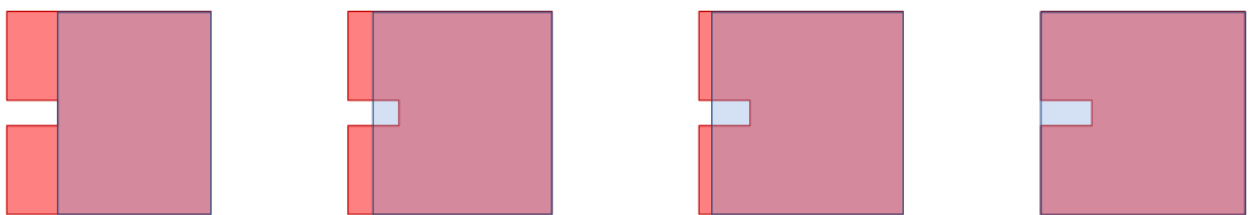


Abbildung 3.3: Generalisierungsalternativen für Einsprünge

Die Zusammenfassung der verwendeten Gebäudegrundrisse ist in Abbildung 3.5 dargestellt. Für jeden der drei Elementtypen werden zwei Tiefen betrachtet, die jeweils in zwei verschiedenen Spalten abgebildet sind. Die Breite der Elemente beträgt 12,5%, 25%, 50% und 75% der Länge der Fassadenlinie, was den vier Zeilen in der Abbildung entspricht. Die Ausnahme stellt lediglich die erste Spalte (Grundrisse 1-4) dar, wo die Grundrisse mit 25%, 50% und 75% der Fassadenlinie beim doppelten Eckversprung und beim einfachen Eckversprung platziert sind.

Der dritte und damit letzte Teil des Tests besteht aus deutlich komplexeren, realen Objekten und stellt nur zwei generalisierte Grundrisse zur Auswahl. Diese sind überlagert abgebildet und stel-

len jeweils eine flächen- und konturgetreue Generalisierungsalternative dar (siehe Abbildung 3.4), wobei eine davon gewählt werden muss.

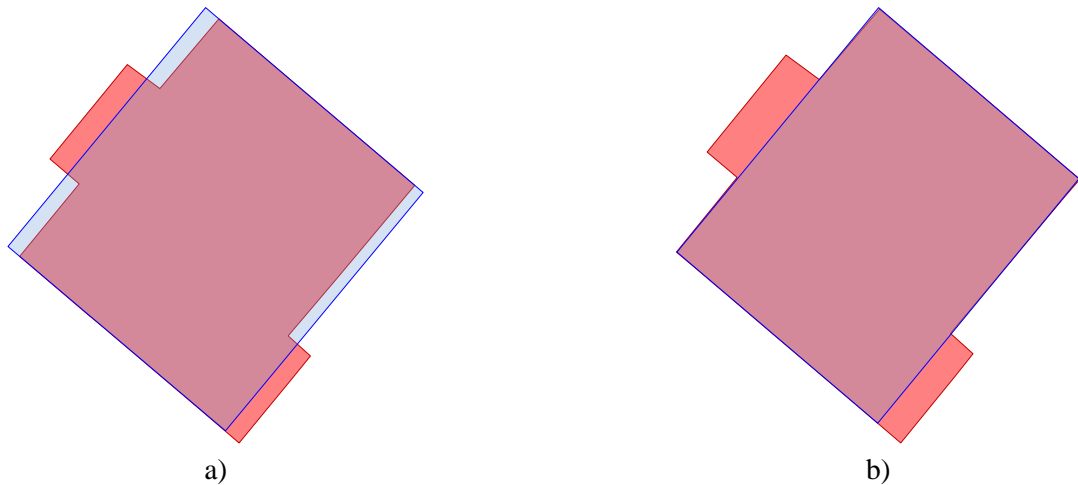


Abbildung 3.4: a) flächen- und b) konturgetreue Generalisierungsalternative eines Grundrisses

Das Ziel des Tests ist es, die Gesetzmäßigkeiten in der Bewertung der Generalisierungsalternativen festzustellen. Dabei sind die möglichen Unterschiede in Abhängigkeit von den folgenden Faktoren zu identifizieren: 1) die Größe des gelöschten Elements im Vergleich zu dem gesamten Objekt, 2) die Konfiguration des gelöschten Elements (z.B. Vorsprung gegenüber dem gleichgroßen Einsprung) und 3) die Unterschiede in der Bewertung der einfachen und komplexeren Objekte. Letztendlich soll herausgefunden werden, welche Charakteristiken für die Wahrnehmung die wichtigste Rolle spielen.

Der ausgearbeitete Wahrnehmungstest stellt eine unabhängige Untersuchung der menschlichen Wahrnehmung der Generalisierungsergebnisse dar, da die Teilnehmer keine Vorkenntnisse bezüglich der in dieser Arbeit vorgeschlagenen Qualitätscharakteristiken haben. Auf diese Weise können die im Rahmen dieser Forschung mathematisch begründeten Behauptungen empirisch geprüft und ergänzt werden.

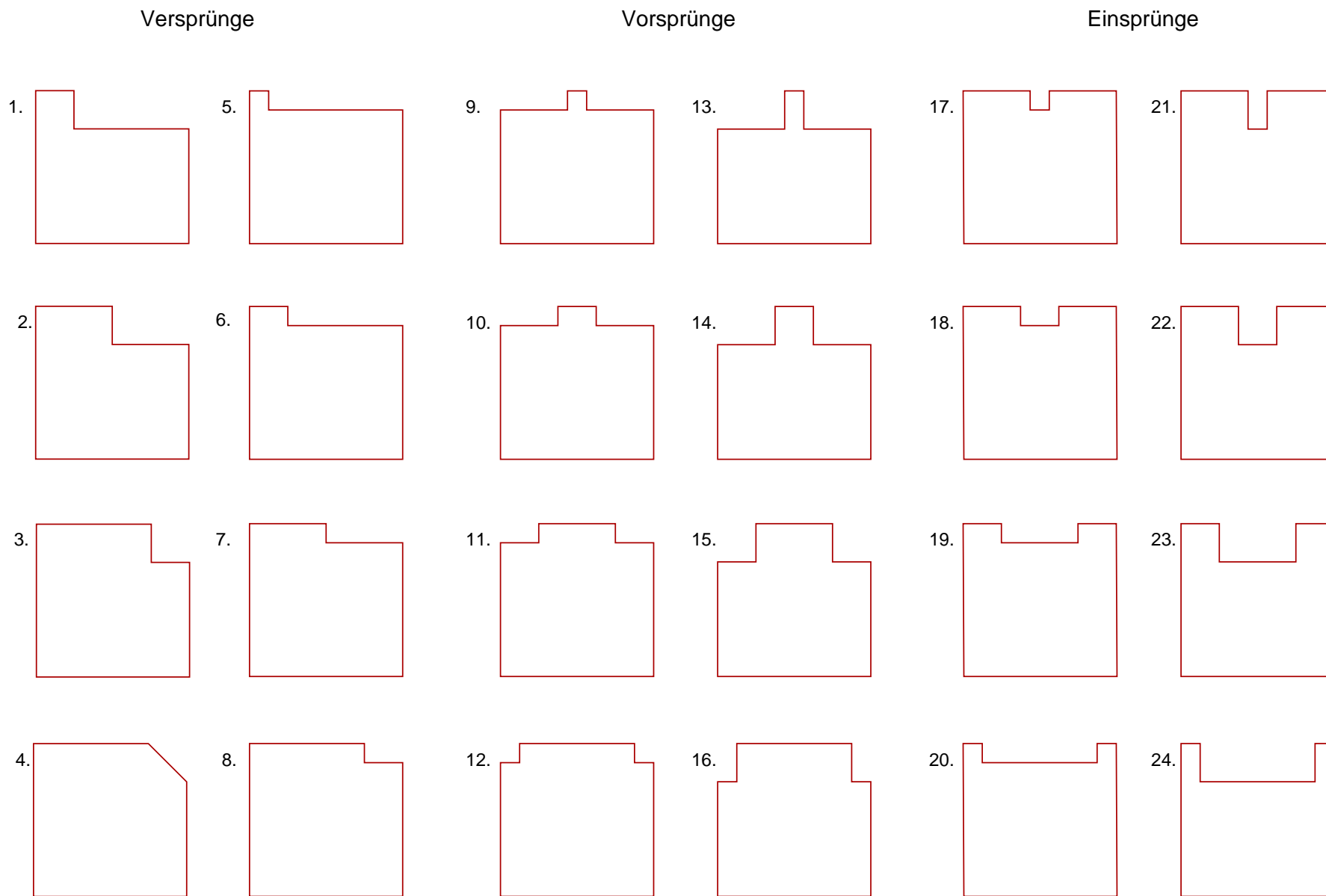


Abbildung 3.5: Zusammenfassung der Grundrisse im Wahrnehmungstest

3.2. Testergebnisse

Anschließend an die Durchführung des im Abschnitt 3.1 beschriebenen Tests wird dessen statistische Auswertung notwendig, wobei die drei Testteile zuerst getrennt bearbeitet wurden. Für jedes Grundrissmodell wurden die Ergebnisse der Bewertung zusammengefasst, danach die Modelle nach der Größe und Form des gelöschten Elements klassifiziert, um einige allgemeine Tendenzen zu dessen Bewertung festzustellen. Abschließend wurden alle Testteile zusammen betrachtet, um die Gemeinsamkeiten und Differenzen in Abhängigkeiten von der Aufgabenstellung herauszufinden.

Die wiederholte Durchführung des Wahrnehmungstest hat in erster Linie zum Ziel, die Teilnehmeranzahl zu erhöhen und nach Möglichkeit verschiedene Teilnehmergruppen mit unterschiedlichen Hintergrundkenntnissen zu erreichen. Auf diese Weise kann der Inhalt nach Bedarf des Tests basierend auf den Ergebnissen der Auswertung angepasst werden, so dass die gesuchten Tendenzen in der Bewertung der Generalisierung noch offensichtlicher zu entnehmen sind.

3.2.1. Auswertung der einzelnen Modelle

Der vorliegende Wahrnehmungstest wurde mit vier unabhängigen Teilnehmergruppen durchgeführt, die sich jeweils aus zwei Gruppen von Studierenden verschiedener Semester des Studienganges Geodäsie und Geoinformatik der Universität Stuttgart und Geoinformatik der Universität Osnabrück bildeten. Der Vorteil dieses Teilnehmerkreises besteht darin, dass die Beteiligten eine fachliche Vorstellung über die kartographische Generalisierung besitzen, mit den speziellen Aspekten dieser Arbeit dennoch nicht vertraut sind. Insgesamt lag die Anzahl der Teilnehmer bei 64 Personen.

Als erstes wurden die Ergebnisse der Generalisierungsbewertung für jede einzelne Gruppe bearbeitet, um irgendwelche Widersprüche aufzudecken und eine entsprechende Erklärung zu finden, die bei der Gesamtauswertung eine wichtige Rolle spielen kann. Da keine wesentlichen Unterschiede zwischen der Bewertung in den vier Gruppen besteht, konnten die Ergebnisse problemlos zusammengefasst werden. Bei der Betrachtung der aus den vier Gruppen resultierenden Ergebnisse, können hauptsächlich drei verschiedene Auswertungsfälle definiert werden. Im ersten Fall werden die Bewertungen eindeutig vergeben, wobei die Präferenzwerte deutlich mit Abstand zu allen anderen an der Spitze liegen. Ein Beispiel dafür ist in Abbildung 3.6 a) gezeigt, dessen entsprechende Auswertung in Abbildung 3.7 a) zu sehen ist. Hier präsentiert die horizontale Achse die vier Generalisierungsalternativen, während die vertikale Achse die Stimmenanzahl in Prozent angibt. Jedes Modell ist durch eine Nummer identifiziert, wobei die zwei Zahlen die Nummer des Testblatts und die Nummer des Modells auf diesem Testblatt präsentieren. Der zweite Fall ist dadurch charakterisiert, dass die Meinungen zu der besten Generalisierungsalternative zwischen zwei Modellen praktisch gleichmäßig geteilt sind. Dies ist das Beispiel in Abbildung 3.6 b), dessen Auswertung in Abbildung 3.7 b) dargestellt ist.

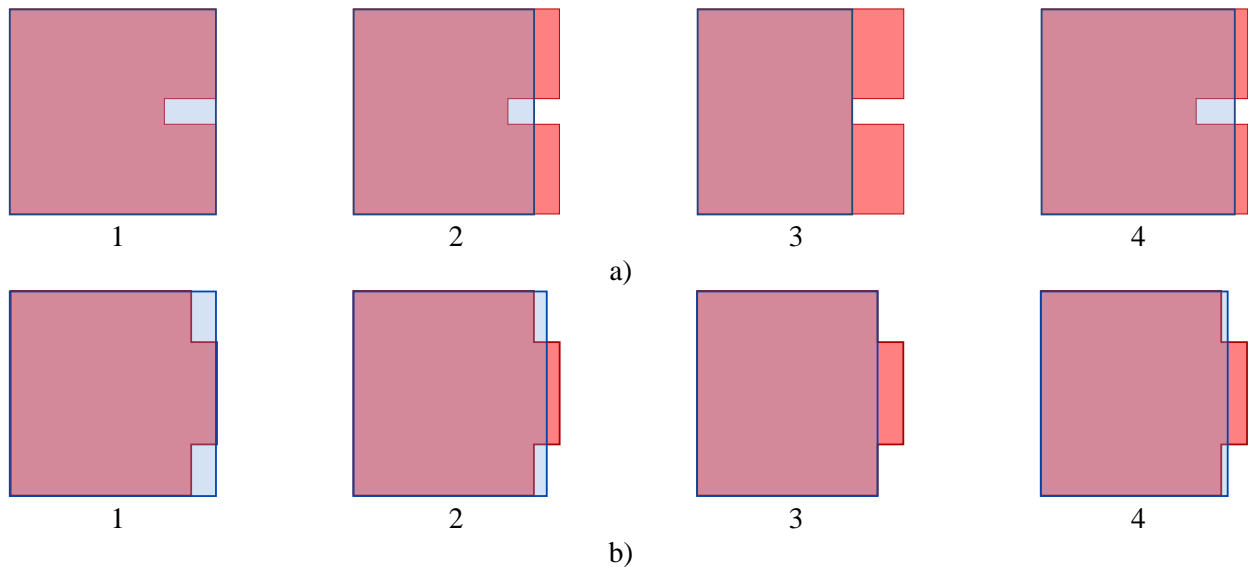


Abbildung 3.6: Auswertungsbeispiele: a) Einsprung, b) Vosprung

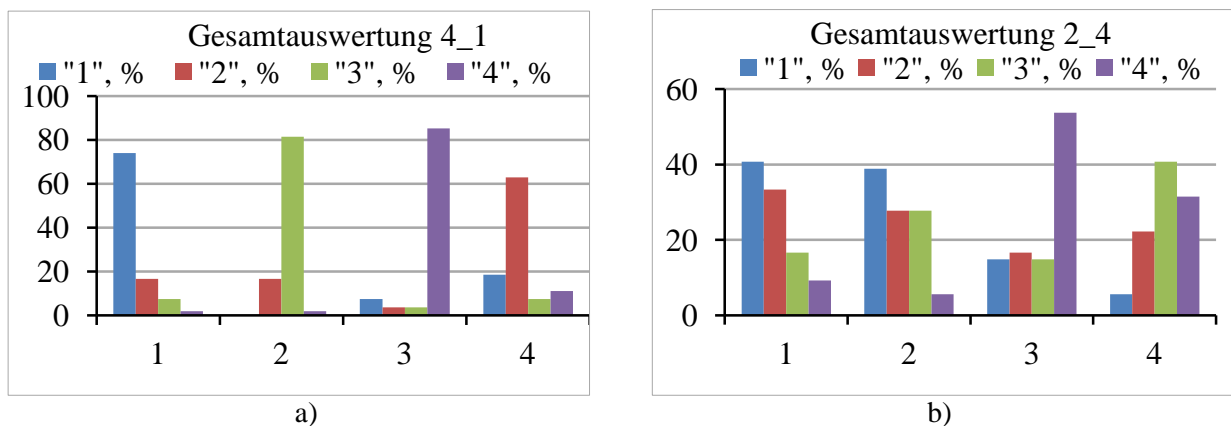


Abbildung 3.7: Auswertung der Vor-, Ein-, und Versprünge

Durch die ersten zwei oben beschriebenen Fälle ist hauptsächlich die Bewertung solcher architektonischer Elemente wie Vor-, Ver- und Einsprünge charakterisiert. Was die Eckversprünge angeht, ist hier eine andere Tendenz zu sehen. Gerade für diese Modelle werden im Test jeweils fünf Generalisierungsalternativen zur Wahl angeboten, wie es Abbildung 3.8 darstellt. Kennzeichnend für deren Bewertung ist, dass immer eine bestimmte Generalisierung als die beste Lösung gewählt ist, während die Verteilung aller anderen Plätze keine klare Tendenz aufweist (siehe Abbildung 3.9 a)). Als die beste Lösung wird dabei die Generalisierung angesehen, wo die zwei langen Seiten des Eckversprungs bis zu deren Schnittpunkt verlängert werden (siehe in Abbildung 3.8 a) und b) die zweite und entsprechend die erste Alternative). Darüber hinaus wird bei manchen Bewertungen der Eckversprünge die schlechteste Lösung eindeutig identifiziert (vgl. Abbildung 3.9 b)). Dies ist die vierte Alternative in Abbildung 3.8 b), wobei eine große unausgegliche Intrusionsfläche entsteht.

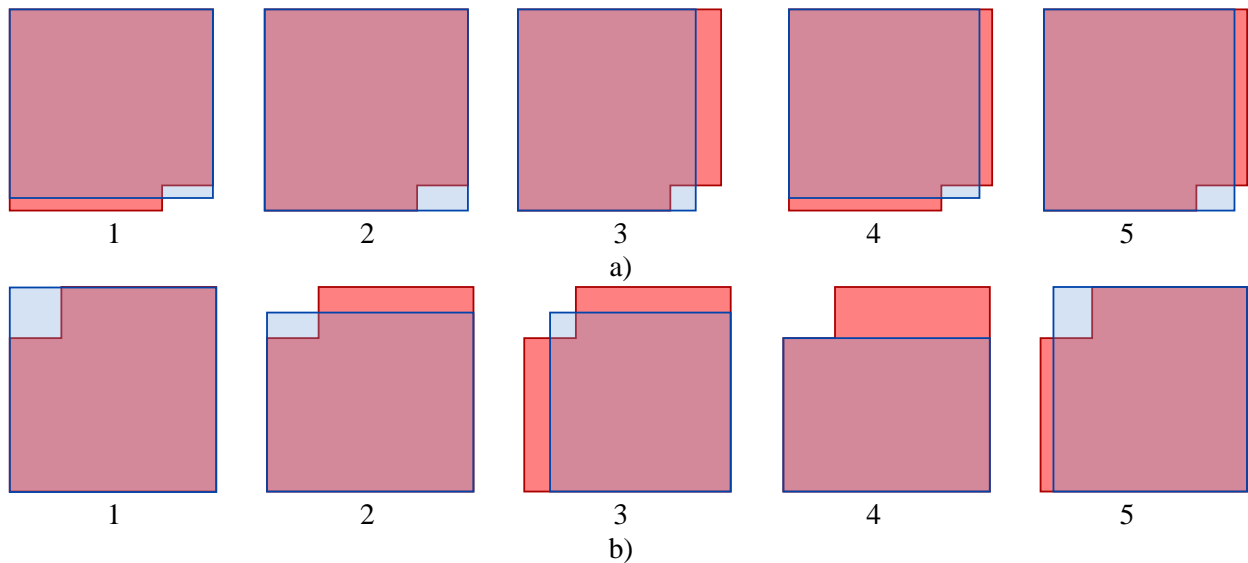


Abbildung 3.8: Auswertungsbeispiele: a) Versprung, b) Eckversprung

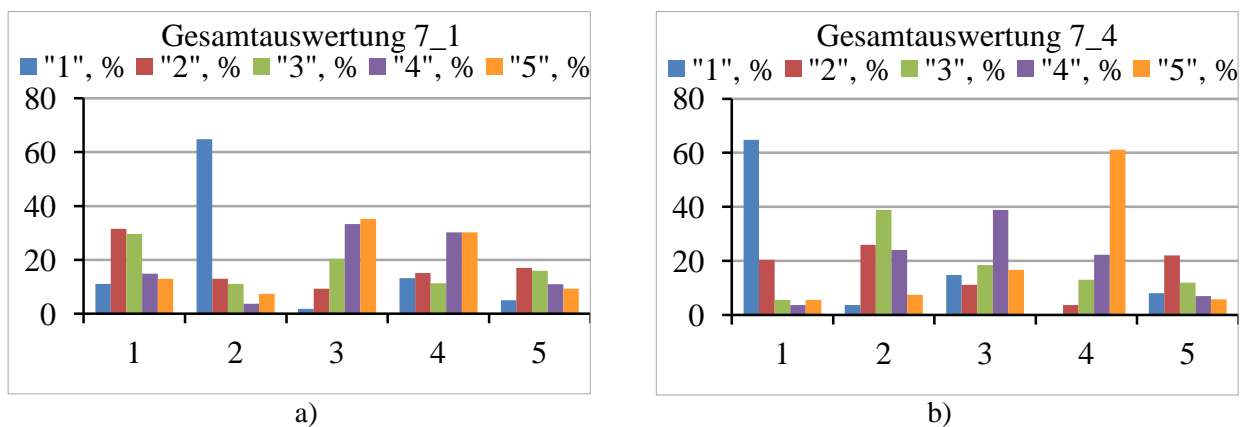


Abbildung 3.9: Auswertung der Eckversprünge

Allgemein ist zur Auswertung aller vorgeschlagenen Modelle anzumerken, dass die schlechteste Generalisierungslösung in den meisten Fällen viel deutlicher als die anderen Bewertungen identifiziert wird. Auf diese Weise sind die Betrachter sich nicht immer einig, was deren Präferenzen hinsichtlich der guten Lösungen anbetrifft, wählen aber dennoch oftmals dieselbe schlechteste Lösung. Diese Erkenntnis spielt eine sehr große Rolle, da diese Lösungen bei den Generalisierungsvorgängen gleich außer Betracht gezogen oder zumindest vermieden werden können.

3.2.2. Zusammenfassende Auswertung

Um alle Ergebnisse des Wahrnehmungstests zusammenzufassen, werden die zur Bewertung vorgeschlagenen Modelle zuerst nach dem Elementtyp sortiert. Somit sind in Tabelle 3.1 drei Blöcke zu sehen, welche der Auswertung von a) Vorsprüngen, b) Seitenversprüngen und c) Einsprüngen entsprechen. Da bei den Eckversprüngen die Bewertung, wie oben beschrieben, sehr eindeutig ist, werden diese nicht weiter betrachtet. Laut dem Aufbau des Tests (siehe Abschnitt 3.1) werden für jeden Elementtyp zwei Tiefen getrennt ausgewertet: klein (links) und groß (rechts). In den Spalten sind die Grundrisse nach der Breite der eliminierten Elemente angeordnet, welche 12,5%, 25%, 50% oder 75% relativ zur Länge der entsprechenden Fassadenlinien ausmachen. Dabei wird für jedes dieser Modelle die Bewertung von jeweils vier Generalisierungsalternativen miteinander verglichen, was durch die vier Zeilen reflektiert ist. Nach der Posi-

tion der generalisierten Linie werden diese Alternativen für Vorsprünge und Seitenversprünge wie folgt bezeichnet (siehe Abbildung 3.2 a)): das Original ist komplett durch das generalisierte Objekt überlagert (C, engl. „complete“); die Generalisierungslinie verläuft genau in der Mitte des gelöschten Elements (M, engl. „middle“), nah an der Fassadenlinie (NL, engl. „near line“) oder direkt auf der Fassadenlinie (L, engl. „line“). Um die Bewertungen für Einsprünge ähnlich darzustellen, werden diese in umgekehrter Reihenfolge angeordnet (vgl. Abbildung 3.3), wobei die erste Alternative einen vollständig gelöschten Einsprung bezeichnet (D, engl. „deleted“). Auf diese Weise wird jede der vier Generalisierungsalternativen (Zeilen) eines eliminierten Elements (Spalten) die dominanten Bewertungen von 1 bis 4 durch die Farben grün, gelb, orange und rot gezeigt, wobei die entsprechende Stimmenanzahl in Prozent gegeben ist. Für die Modelle, welche im Test mehrmals vorkommen, wird in dem Fall der Mittelwert genommen, da der Unterschied in der Bewertung immer sehr klein ist. Die Wahl der besten Generalisierungen in Abhängigkeit von der Breite des gelöschten Elementes und Flächenveränderung ist in Tabelle 3.2 zu sehen.

Vorsprung, %	12,5%	25%	50%	75%
C	53	44	41	67
M	63	43	39	59
NL	48	30 33(3)	41	53
L	61	44	54	74

Vorsprung, %	12,5%	25%	50%	75%
C	61	38	44	76
M	50	34	46	73
NL	43	36	44	74
L	43	38 34(1)	63	76

a)

Versprung, %	12,5%	25%	50%	75%
C	48	54	44	79
M	44	41 37(2)	41	58
NL	30 35(3)	33 28(3)	33 37(4)	62
L	56	43	46	81

Versprung, %	12,5%	25%	50%	75%
C		54	38	65
M		35 30(2)	50	39
NL		40	46	39
L		41	56	61

b)

Einsprung, %	12,5%	25%	50%	75%
D	70	72	53	34 36(4)
M	70	58	35 37(2)	42
NL	61	49	40	32
C	80	70	51	32 30(1)

Einsprung, %	12,5%	25%	50%	75%
D	85	72	57	38
M	81	59	46	34(1/2)
NL	63	54	52	40
C	74	72	43	38

c)

Tabelle 3.1: Auswertung von Testergebnissen nach Elementtyp und Größe

Vorsprung, AD					Einsprung, AD				
	12,5%	25%	50%	75%		12,5%	25%	50%	75%
C	+12%	+14%	+7%	+3%	D	-11%	-10%	-7%	-3%
	+28%	+23%	+14%	+7%		-23%	-20%	-14%	-8%
M	+5%	+3%	0	-3%	M	-5%	-3%	0	+3%
	+12%	+8%	0	-7%		-10%	-7%	0	+8%
NL	+2%	0	-3%	0	NL	-2%	0	-3%	0
	+4%	0	-7%	0		-3%	0	-7%	0
L	-2%	-3%	-7%	-10%	C	+2%	+3%	+7%	+10%
	-4%	-8%	-14%	-20%		+3%	+7%	+14%	+23%

Tabelle 3.2: Die bevorzugten Generalisierungslösungen nach Elementtyp und Größe

Die grafische Interpretation der Testergebnisse ist am Beispiel von Vorsprüngen großer Tiefe (siehe Tabelle 3.1 a), links) und Breite 12,5 %, 50 % und 75 % der Fassadenlinie in Abbildung 3.10 gegeben. Hier sieht man, wie mit der Veränderung der Größe des gelöschten Elements sich die Vorzüge der menschlichen Betrachter ändern.

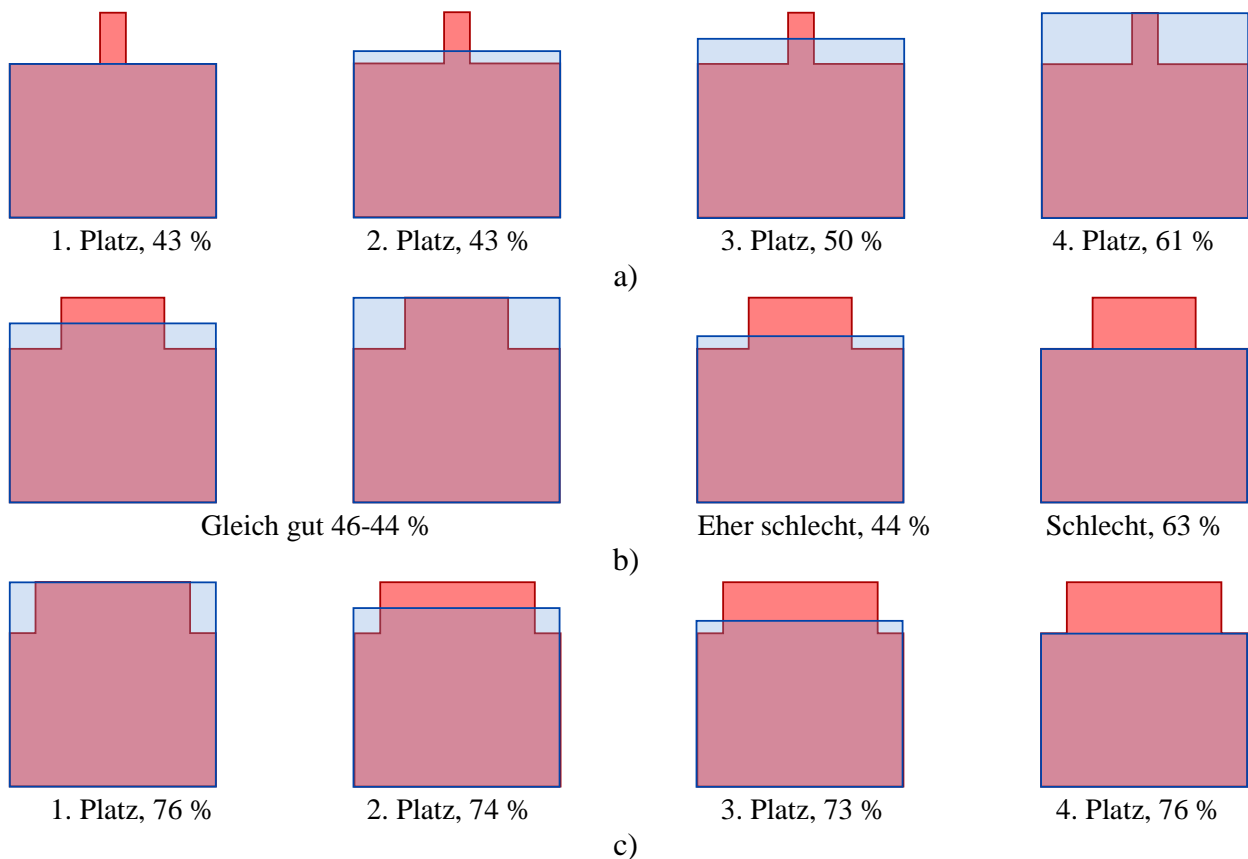


Abbildung 3.10: Interpretation von Bewertungen der Generalisierungsalternativen

Aus diesem Grund ist es von großer Bedeutung herauszufinden, wie die Abhängigkeit zwischen der Position der generalisierten Linie zur Fassadenlinie und der Größe der Flächenveränderung ist. Die zwei am häufigsten bevorzugten Generalisierungsergebnisse sind in Tabelle 3.2 dargestellt. Da die Bewertung von Vorsprüngen und Seitenversprüngen sehr ähnliche Ergebnisse aufweist, werden diese zusammengefasst (siehe Tabelle 3.2 a)). Die Zahlen in jeder Zelle reflektieren die Flächenveränderung, welche durch die entsprechende Generalisierung verursacht wird. Dabei sind die Werte für die kleine und große Tiefe des gelöschten Elements oben und unten gezeigt. Hier ist deutlich zu sehen, dass in den meisten Fällen die konturtreue Generalisierung

bevorzugt wird, wenn sogar dadurch große Extrusionsflächen (bis 14 %) entstehen. Dabei werden die flächentreuen Lösungen erst als zweitbeste bewertet. Insbesondere werden die Intrusionen als nicht gut angesehen, bei denen relativ große Flächen des originalen Objekts eliminiert werden.

Aufgrund dieser Ergebnisse können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Bei der Bewertung der Generalisierungsalternativen wird sowohl die Konturübereinstimmung als auch der Flächeninhalt beachtet
- Es wird versucht, den Flächeninhalt auszugleichen
- Wenn dadurch die generalisierte Linie nahe an eine dominante Originallinie zu liegen kommt, so wird die Übereinstimmung dieser Linie bevorzugt
- Die Tendenz ist, Elemente nicht zu löschen, sondern diese mit einzubeziehen, d.h. durch vergrößerte, aber simplifizierte Grundflächen zu überlagern

Diese Erkenntnisse aus dem Wahrnehmungstest sind bei der Definition und Ausarbeitung von Charakteristiken zur Qualitätsbewertung zu berücksichtigen. Vorschläge für konturbezogene und flächenbezogene Maße werden in den Kapiteln 6 und 7 dargelegt.

4 Ähnlichkeitsbewertung

Die Generalisierung ist ein Datenverarbeitungsprozess, bei dem Informationen abstrahiert, aufbereitet und gestaltet werden und erfordert daher eine qualitative Bewertung der erzeugten Ergebnisse. Da im Fokus dieser Arbeit speziell die kartographische Generalisierung liegt, die vor allem die Visualisierungsaspekte von Geodaten betrifft, wird im Folgenden die Qualität im Sinne der geometrischen Genauigkeit diskutiert.

Laut dem in ISO 19113 (2002) festgelegten Qualitätsmodell wird die geometrische Qualitätskomponente durch Charakteristiken wie Positions- bzw. Lagegenauigkeit reflektiert. Dennoch ist die Koordinatengenauigkeit generell nicht zur Bewertung der aus der Generalisierung resultierenden Objekte geeignet. Dies ist grundsätzlich durch die spezifischen Veränderungen am Objekt bedingt. Die Anzahl von Knoten und Kanten wird durch die Generalisierung reduziert, so dass ganze Segmentzüge durch einzelne Kanten ersetzt werden. Dabei können einige Knoten verschoben oder komplett gelöscht und andere neu hinzugefügt werden. Auf diese Weise kann die Objektkontur durch den Generalisierungsvorgang im Detail einen anderen Verlauf erhalten, obwohl die allgemeinen Objektmerkmale wie Form oder Orientierung nach Möglichkeit unverändert bleiben sollen.

Die Beurteilung des Änderungsgrads von Objekten kann als Qualitätsbewertung des Generalisierungsprozesses bezeichnet werden. Diese Thematik hat sich als vielschichtig und bei weitem als nicht trivial erwiesen. Angesichts der nicht mehr existierenden Knoten kann die Generalisierungsqualität auf Basis der Koordinatengenauigkeit nur noch annähernd geschätzt werden, wodurch eine solch simple Qualitätsbetrachtung als wenig sinnvoll erscheint. Außerdem wird der Vergleich von Objekten auch dadurch erschwert, dass die Zuordnung von Objektelementen oftmals nicht eindeutig durchgeführt werden kann. Als Grund dafür kann sowohl die komplexe Form des betrachteten Originalobjekts als auch der auf diesem angewendete Generalisierungsvorgang genannt werden. Denn die Anpassung erfolgt oftmals iterativ oder der Vorgang impliziert die Verwendung mehrerer Operatoren, um das endgültige Ergebnis zu generieren. In diesen Fällen können die geometrischen Beziehungen von einem generalisierten Objekt zu dessen Original ohne verfahrensbezogenes Wissen, also wie sich die Punkte und Linien durch die Generalisierung verändert haben, unterschiedlich interpretiert werden. Um irgendwelche Annahmen diesbezüglich zu vermeiden muss die Abweichung bzw. Ähnlichkeit der Objekte vor und nach der Generalisierung statt auf der Koordinatengenauigkeit aufgrund anderer geometrischer Kriterien abgeschätzt werden.

In diesem Kapitel werden die Grundlagen des Vergleichs zweier Objekte zunächst ohne Rücksicht auf die Generalisierung umfassend diskutiert. Zu diesem Zweck wird als Erstes die Definition der Ähnlichkeit aus dem Blickwinkel der menschlichen Wahrnehmung, basierend auf den Prinzipien der Gestalttheorie, eingeführt. Anschließend werden die rechnerischen Aspekte der Ähnlichkeitsschätzung der Objekte aufgrund von einzelnen und mehreren Eigenschaften diskutiert, die aus dem Bereich der multivariaten Analyse stammen. Zum Schluss werden die Klassifizierungsmöglichkeiten der vielfältigen geometrischen Charakteristiken eines Objekts betrachtet.

4.1. Ähnlichkeit und Wahrnehmung

Der Begriff „Ähnlichkeit“ (engl. „similarity“) ist im weitesten Sinn recht umfassend und kann in Abhängigkeit von einem Anwendungsbereich und einer Betrachtungsweise unterschiedlich definiert werden. Doch in erster Linie bezieht er sich unmittelbar auf das Feld der menschlichen

Wahrnehmung und spielt eine markante Rolle für die Kognitionswissenschaften. Somit stammen die ersten Definitionen für Ähnlichkeit aus der Philosophie, deren spezielle Bereiche hinsichtlich der Untersuchung des menschlichen Geistes sich später zu einer selbstständigen Disziplin, der Psychologie, entwickelt haben (Steffens, 2007). Dementsprechend lautet die rein deskriptive Definition der Ähnlichkeit, dass ähnlich aussehende Objekte miteinander perzeptiv gruppiert werden.

Der Empfindung der visuellen Informationen durch einen menschlichen Betrachter, die auch als perzeptive Organisation oder perzeptives Gruppieren bezeichnet werden kann, widmet sich die Gestaltpsychologie (Lowe, 1986). Dabei wird der Prozessablauf der Objekterkennung und Objektzuordnung innerhalb einer Szene bzw. Kategorisierung untersucht, um die vorhandenen Strukturen festzustellen. Das Vorhaben, einige Regelmäßigkeiten dabei aufzudecken und sie in Form von Gesetzen (Gestaltprinzipien) zum Ausdruck zu bringen, spiegelt sich im Rahmen der sogenannten Gestalttheorie wider. Zu den wichtigsten erkannten Gestaltprinzipien gehören Nähe (engl. „proximity“), Fortsetzung (engl. „closure“) und Ähnlichkeit von Objekten. Demzufolge werden Objekte nach dem Prinzip der Nähe aufgrund der geometrischen Distanzen zueinander oder der veränderten Dichte gruppiert. Laut dem Gesetz der Fortsetzung werden einzelne Objekte, obwohl sie durch Lücken getrennt sind, als Ganzes betrachtet. Dabei werden die fehlenden Verbindungen durch die Vorstellungskraft aufgefüllt. Im Gegensatz dazu werden bei der guten Fortsetzung die einzelnen Objekte gerade aufgrund einer direkten Verbindung zusammengefasst. Das letzte Prinzip der Ähnlichkeit lässt Objekte gemäß deren äußeren Erscheinung gruppieren. Die Ähnlichkeitsbestimmung oder -messung impliziert in der Regel den Vergleich der Objekte aufgrund von Eigenschaften wie Farbe, Textur und Form oder deren Kombinationen.

Trotz einer solchen Klassifizierung dürfen die Gestaltprinzipien nicht einzeln betrachtet werden, sondern es ist deren Wechselwirkung zueinander zu beachten. In (Schlüter, 2001) sind einige Arbeiten vorgestellt, die sich mit dem gegenseitigen Einfluss verschiedener Faktoren befassen wie bspw. Nähe gegenüber Ähnlichkeit. Aus den Wahrnehmungstests stellte sich heraus, dass diese Faktoren bei unterschiedlicher Betrachtungszeit verschiedene Dominanzen aufweisen können. Demnach erfolgt das Gruppieren der Objekte bei kurzer Betrachtung nach dem Prinzip der Nähe, wobei die Ähnlichkeit bei der längeren Betrachtungszeit überwiegt. Beachtenswert ist auch der Vergleich solcher Ähnlichkeitsfaktoren wie Farbe und Objektform, wobei das Gruppieren aufgrund der Farbe mit Abstand dominiert. Dies spricht dafür, dass die Verarbeitung der Informationen bezüglich der Objektform deutlich komplizierter und aufwändiger für einen menschlichen Betrachter ist als die Empfindung eines Abstands oder Farbe. Dabei ist natürlich zu berücksichtigen, dass die Ergebnisse auch davon abhängen können wie stark sich z.B. die Farbtöne voneinander unterscheiden.

Auf diese Weise nimmt Ähnlichkeit eine Schlüsselposition bei der Untersuchung und Beschreibung der menschlichen Wahrnehmung ein. Das Thema wird immer wichtiger, da die mathematischen Berechnungen nicht immer das widerspiegeln, was in der Tat empfunden wird. Hier ist es notwendig darauf hinzuweisen, dass in dieser Arbeit ausschließlich auf den Formaspekt der Ähnlichkeit eingegangen wird. Laut der rein mathematischen Definition gelten zwei geometrische Objekte als ähnlich, wenn sie dieselbe Form aufweisen und mithilfe der isometrischen Transformationen exakt ineinander umgerechnet werden können. Dies wird als Ähnlichkeitsabbildung bezeichnet und schließt zusätzlich zu den Kongruenztransformationen, d.h. Translation, Drehung und Spiegelung, auch Skalierung mit ein. Im Unterschied dazu werden zwei Objekte im Bereich der Objekterkennung als ähnlich betrachtet, wenn ihre Unterschiede einen gewissen Schwellwert nicht überschreiten. Eine solche Betrachtungsweise ist wesentlich flexibler und entspricht der menschlichen Ähnlichkeitswahrnehmung, wobei die gleichartigen Objekte oder Objektteile

trotz einiger Abweichungen und gewisser Variationen identifiziert und einer bestimmten Klasse zugeordnet werden können. Viele wissenschaftliche Arbeiten widmen sich dem Auffinden optimaler Merkmalskombinationen und entsprechender Schwellwerte für konkrete Objekttypen, um die menschliche Wahrnehmung möglichst genau zu simulieren. Eine Aufgabe wie z.B. die automatisierte Extraktion von Objekten (Gebäude, Vegetation, Wasserobjekte usw.) aus Luft- und Satellitenbildern benötigt eine andere Vorgehensweise als die Bildsuche in einer Wappendatenbank oder die Suche nach Anomalien in einem medizinischen Bild. Damit stellt sich die eigentliche Frage, wie überhaupt Ähnlichkeit bewertet wird.

4.1.1. Grundlagen der Ähnlichkeitsbestimmung

Die Ähnlichkeitsbestimmung (engl. „similarity measure“) hat zum Ziel, den Übereinstimmungsgrad von Objekten aufgrund der oben genannten Eigenschaften zu messen. Unter den unmittelbaren Ähnlichkeitsberechnungen können solche Charakteristiken wie die Flächen- und Konturüberlappung oder das Verhältnis zwischen den jeweiligen Eigenschaften eines untersuchten Objekts und dessen Referenz genannt werden. Zu den Letzteren zählen z.B. verschiedene Variationen des Füllungs-faktors (siehe Anhang B.1.2). Eine Normalisierung sorgt dafür, dass die Ähnlichkeitsmaße unabhängig von der Objektgröße miteinander verglichen werden können. Dabei wird der größte Wert 1 in dem Fall erreicht, wenn die Objekte absolut identisch sind und nimmt ab, je weniger Gemeinsamkeiten die Objekte aufweisen.

Ähnlichkeitsbestimmung ist nicht nur auf die Berechnung der Übereinstimmungsmaße beschränkt, wie es aus der eigentlichen Bezeichnung gefolgert werden kann. Durch die Spezifika der Aufgaben, für deren Lösung die Ähnlichkeitsbestimmung eingesetzt wird, liegt der Untersuchungsfokus oftmals eher auf der Abschätzung der Unterschiede zwischen den Objekten. Eine solche Fragestellung ist wesentlich sinnvoller, wenn das Vorkommen einer Objektveränderung im Laufe der Zeit oder infolge einer Datenverarbeitung identifiziert und quantitativ bestimmt werden muss. Auch die Klassifizierung von Objekten und die Zuordnung der Ergebnisse einer Bildsuche werden üblicherweise mithilfe eines Schwellwertes durchgeführt, der als maximal zulässiger Unterschied zwischen dem betrachteten und ursprünglichen Objekt vorgegeben wird. Demzufolge wird genau das Gegenteil der Ähnlichkeit von Interesse sein, welches sich durch die Inversion der primären Charakteristik wie in (4.1) ableiten lässt.

$$D = 1 - SM \quad (4.1)$$

Hier steht die Abkürzung SM für die Ähnlichkeit und D für den Unterschied (engl. „diversity“) bzw. Unähnlichkeit (engl. „dissimilarity“). Trotz der Komplementarität wird D oftmals auch mit Ähnlichkeit bezeichnet, wobei man darunter die Umwandlung nach der angeführten Formel versteht (Krzanowski, 2000).

Der Betrag des Unterschieds zwischen den Objekten kann auch direkt geschätzt werden, wobei genau diese Art der Berechnung deutlich häufiger vorkommt. Bei dem Vergleich der Objekte aufgrund eines einzigen Merkmals kann deren Unterschied nach der Differenz zwischen den entsprechenden Charakteristiken beurteilt werden. Es ist jedoch wesentlich schwieriger, mehrere Merkmale gleichzeitig zu berücksichtigen. Eine allgemeingültige Lösung zu diesem Problem besteht in der Verwendung von Merkmalsvektoren zum Zweck der Aggregation von Objekteigenschaften, die gemeinsam in Betracht gezogen werden. Ausführlicher wird das Thema in Abschnitt 4.1.3 dargestellt. Dabei wird die Ähnlichkeitsbestimmung zwischen Objekten mit der

Festlegung einer Distanz-Funktion in dem Merkmalsraum assoziiert. Je größer der Wert der Distanz ist, desto weniger Ähnlichkeit weisen die Objekte auf.

Es hat sich gezeigt, dass der Vergleich von Objekten basierend auf den Distanzen zwischen ihren Merkmalsvektoren sehr effektiv ist. Anhand dieser Betrachtungsweise lassen sich die Ergebnisse auch anschaulich darstellen. Dazu dienen die Eigenschaften des Referenzobjekts als Ausgangspunkt für den Merkmalsraum, in dem die zu vergleichenden Objekte in Abhängigkeit ihres Ähnlichkeitsgrads vom Ursprung entfernt sind. Die Zweckmäßigkeit der direkten Distanzberechnung konnte auch durch empirische Untersuchungen bewiesen werden. Die psychologischen Abfragen bezüglich der visuellen Wahrnehmung des Menschen weisen darauf hin, dass in erster Linie die Unterschiede zwischen den Objekten berücksichtigt werden. Damit spielen sie beim Vergleich von Objekten eine dominantere Rolle gegenüber den Gemeinsamkeiten von Eigenschaften (Eidenberger, 2003).

Wie oben schon erwähnt, benötigen die meisten Ähnlichkeitsmaße eine Normierung, um den sinnvollen Vergleich miteinander zu ermöglichen. Verschiedene Möglichkeiten, die sich zur Lösung dieser Frage bieten, werden eingehend im nächsten Abschnitt erläutert.

4.1.2. Normierung der Ähnlichkeitsmaße

Die eigentlichen Werte der Objektmerkmale und deren Differenzen sind von sich aus nicht viel-sagend, da in der Regel verschiedene Eigenschaften unterschiedliche Wertebereiche aufweisen und diese damit nicht vergleichbar sind. Um diese Unannehmlichkeit zu beheben, wird eine Normierung bzw. Skalierung des Wertebereichs auf ein festes Intervall, üblicherweise zwischen Null und Eins, durchgeführt. Eine solche Darstellung der Werte ist deutlich anschaulicher und ermöglicht es, die Größe der Objekteigenschaften und insbesondere deren Unterschiede ohne weiteres zu beurteilen.

Beim Vergleich von Objekten sind zwei verschiedene Fälle auseinanderzuhalten, die entweder auf der statistischen Auswertung eines Datensatzes oder auf der Gegenüberstellung zweier Individuen basieren (Krzanowski, 2000). Sie dienen dementsprechend unterschiedlichen Zwecken.

Wenn mehrere Objekte eines Datensatzes in Betracht gezogen werden müssen, wird der Normierungsfaktor eines Merkmals aufgrund der Größe des entsprechenden Wertebereichs geschätzt. Solch eine Situation kommt typischerweise bei der Klassifizierung bzw. Diskriminierung von Objekten im Bereich der Mustererkennung (Esbensen et al., 2004) und Clusteranalyse (Voss and Süße, 1991) vor. Mithilfe der Normierung werden die Werte unterschiedlicher Charakteristiken mit verschiedenen Spannbreiten auf eine gemeinsame Basis gebracht und dadurch vergleichbar und miteinander kombinierbar gemacht. In Bezug auf das Thema dieser Arbeit kommt der Fall bspw. dann vor, wenn Gebäudeblöcke nach der Objektgröße oder nach anderen Formeigenschaften segmentiert werden müssen und das Ergebnis als Basis für unterschiedliche Vorgehensweisen für die Generalisierung oder einer weiteren Qualitätsbewertung dienen können (siehe Abschnitt 2.2.4).

Sei $X = \{x_i | i = 1, \dots, n\}$ eine Menge von Objekten, die jeweils durch einen Satz von Merkmalen $x_i = \{F_{i1}, F_{i2}, \dots, F_{im}\}$ charakterisiert sind. Die Gesamtheit der Werte jedes einzelnen Merkmals $F_j = \{F_{1j}, F_{2j}, \dots, F_{nj}\}$ können als Stichproben einer Zufallsvariable betrachtet werden. Die Normierung eines Merkmals erfolgt dann auf die einfachste Art und Weise nach (4.2), wobei die

Größe des Wertebereichs anhand der Spanne zwischen dem maximalen und minimalen Wert im Datensatz berechnet wird (Aksoy and Haralick, 2001).

$$\widehat{F}_{ij} = \frac{F_{ij} - \min(F_j)}{\max(F_j) - \min(F_j)} \quad (4.2)$$

Diese Berechnungen stellt eine lineare Transformation der Merkmalswerte dar. Der Unterschied zwischen Objekten wird aufgrund eines Merkmals proportional zur Größe des Wertebereichs geschätzt. Falls Unterschiede anders beurteilt werden müssen, kann der Normierungsfaktor als eine exponentielle Funktion der Merkmalsgröße geschätzt werden (Krzanowski, 2000). Auf diese Weise hängt der Ähnlichkeitsgrad der Objekte innerhalb eines Datensatzes davon ab, wie weit voneinander die entsprechenden Merkmalsgrößen im Wertebereich liegen.

Ein anderes Ziel wird beim Vergleich zweier Individuen verfolgt. Hier werden oftmals die Objekte mit ähnlichen Eigenschaften verglichen. Dabei wird der Unterschied zwischen zwei Objekten in Abhängigkeit von der Merkmalsgröße, die sie kennzeichnet, bewertet. D.h. ein und derselbe absolute Differenzbetrag der entsprechenden Merkmale wird speziell für jedes Objektpaar normiert. Diese Vorgehensweise eignet sich insbesondere für die Identifizierung der Veränderung eines Objekts, deren Betrag im Verhältnis zu dem Referenzobjekt geschätzt werden muss. Als Normierungsfaktor wird in dem Fall üblicherweise das Maximum beider Merkmalswerte genommen. Dementsprechend wird der Unterschied zweier Objekte x_1 und x_2 aufgrund des Merkmals F_j nach (4.3) bewertet:

$$D(x_1, x_2) = \frac{(F_{1j} - F_{2j})}{\max(F_{1j}, F_{2j})} \quad (4.3)$$

Auf diese Weise wird der Anteil der Differenz zum Gesamtbetrag des betrachteten Merkmals berechnet. Typischerweise handelt es sich dabei um die Merkmale, deren Unterschied in Abhängigkeit von der Objektgröße wie Fläche oder Umfang bewertet werden muss. Somit wird der gleiche Differenzbetrag besser für ein größeres und schlechter für ein kleineres Objekt geschätzt.

Grundsätzlich spielt das Thema der Normalisierung der Merkmalsbeträge eine sehr wichtige Rolle. Einerseits ermöglicht dies, die Ergebnisse mit unterschiedlicher Wertespanne miteinander zu vergleichen oder sogar gemeinsam zu bearbeiten. Andererseits darf es nicht zur Verfälschung der Ergebnisse führen. Im Fall der Qualitätsbewertung wird besonders negativ angesehen, wenn die Ergebnisse der Ähnlichkeitsbestimmung überschätzt werden, da es zu unerwünschten und manchmal schwerwiegenden Folgen führen kann. In dem Sinne sind die unterschätzten Charakteristiken, welche die Situation etwas zu negativ darstellen als sie tatsächlich ist, nicht so kritisch einzustufen.

4.1.3. Merkmalsvektoren und Distanzen

Wie oben dargelegt wird, kann die Ähnlichkeit der betrachteten Objekte hinsichtlich der einen oder anderen Eigenschaft aufgrund der Differenz zwischen den jeweiligen Charakteristiken beurteilt werden. Nichtsdestoweniger ist es oftmals schwierig oder sogar unmöglich, eine adäquate Vorstellung über die Objekte und deren Zusammenhänge ausschließlich basierend auf den einzelnen Merkmalen zu erhalten. Die Welt ist multivariat und deren Phänomene sind komplex und von mehreren Faktoren abhängig (Esbensen et al., 2004). Demzufolge besteht Bedarf an Aggregationsverfahren, so dass mehrere heterogene Charakteristiken eines Objekts in deren Gesamt-

heit berücksichtigt werden können. Im Folgenden handelt es sich um die normierten Charakteristiken.

Zur Lösung dieses Problems wird aufgrund der gewählten Objektcharakteristiken, die sich anwendungsbezogen als signifikant erwiesen haben, ein multidimensionaler Merkmalsraum aufgespannt. Hierbei entspricht jede einzelne Objektcharakteristik mit deren entsprechenden Maßeinheiten einer Achse bzw. Dimension dieses Raums. Demzufolge kann ein Objekt durch einen sogenannten Merkmalsvektor (engl. „feature vector“) beschrieben werden, dessen Elemente die Werte festgelegter Charakteristiken sind. Bei der Darstellung können diese auch als Koordinaten auf den jeweiligen Merkmalsachsen betrachtet werden. Daraus stammt für die Datenstruktur die Bezeichnung Vektorraummodell. Ein solcher Merkmalsvektor ist nichts anderes als eine multidimensionale Variable, die in einem Merkmalsraum durch einen Punkt präsentiert werden kann (Krzanowski, 2000). Auf diese Weise können die Merkmalsvektoren verschiedener Objekte aufgrund ihrer Raumpositionen verglichen werden. Dabei gilt die Annahme, dass je näher die Punkte im Merkmalsraum zueinander liegen, desto höher die visuelle Ähnlichkeit zwischen den entsprechenden Objekten ist (Aksoy and Haralick, 2001). Diese Vorgehensweise ermöglicht es, die Ähnlichkeitsbestimmung zwischen Objekten aufgrund eines Merkmalsatzes geometrisch zu interpretieren und auf die Berechnung der Distanzen zwischen deren charakteristischen Vektoren zurückzuführen. Die geometrische Interpretation der Ergebnisse ist sehr anschaulich und erlaubt es, mehrere Objekte gleichzeitig zu vergleichen. Jedoch ist die Anzahl der betrachteten Merkmale durch das darstellende Medium begrenzt. Bei der Berechnung der Distanzen zwischen Merkmalsvektoren, die unbeschränkt viele Komponente besitzen können, wird lediglich die Ähnlichkeit zweier Objekte festgestellt.

Für den Vergleich zweier Merkmalsvektoren stehen viele verschiedene Distanzfunktionen zur Verfügung, welche die Eigenschaften des betrachteten Vektorraumes festlegen. Unter Erfüllung der Bedingungen von Positivität, Symmetrie und Dreiecksungleichung werden diese Distanzfunktionen auch als Metriken genannt. Dementsprechend kann die Diskriminierung der Objekte in Abhängigkeit von der Wahl der Distanzfunktion zwischen deren Merkmalsvektoren unterschiedlich geregelt werden. Die zu diesem Zweck am häufigsten verwendeten Distanzfunktionen sind in Anhang A aufgelistet.

Der Anwendungsbereich der Merkmalsvektoren für den Vergleich von Objekteigenschaften ist sehr breit. Z.B. wird in (Eidenberger, 2000) das Konzept der Merkmalsvektoren für die bildbasierte Suche innerhalb einer graphischen Datenbank verwendet. Der Ansatz in (Schlüter, 2001) widmet sich der Modellierung eines hierarchischen perceptiven Gruppierens aufgrund von Nähe und Ähnlichkeit (siehe Abschnitte 2.2.4 und 4.1). Basiert auf den Verhältnissen zwischen der Objektfläche und der Fläche des minimal umschließenden Rechtecks werden Merkmalsvektoren für die Objekterkennung in (Hild, 2003) eingesetzt. In der Arbeit von Volz (2006) wird anhand von Merkmalsvektoren die Objektzuordnung innerhalb von Straßennetzen durchgeführt. Unterschiedliche Distanzfunktionen aus verschiedenen Wissenschaftsfeldern werden zum Vergleich von Medienobjekten, die durch MPEG-7 Deskriptoren identifiziert werden, in (Eidenberger, 2006) aufgelistet und analysiert.

Im Bereich von Geodaten wird auch oftmals die gewichtete Manhattan-Metrik, wie in (4.4), verwendet, wobei die Gewichtswerte die Wichtigkeit jedes einzelnen Merkmals für das Endergebnis widerspiegeln und deren Summe 1 betragen muss. Bspw. dienen die Gewichte im Bereich der Objekterkennung zur besseren Diskriminierung von Objektklassen und werden auf solch eine Weise angepasst, dass die Ähnlichkeit von Objekten aus derselben Klasse, sowie Unterschiede zwischen verschiedenen Klassen betont werden (Wang et al., 2010).

$$AV_i = \sum_{k=1}^p w_{ik} \cdot d_{ik} \quad (4.4)$$

Hier können als d_{ik} nicht nur die absoluten Differenzen zwischen den Werten entsprechender Merkmale, wie in (A.1), verwendet werden, sondern auch die direkt berechneten geometrischen Distanzen zwischen den Objekten, welche im Anhang B.3 dargestellt werden. Auf diese Weise wird in der Arbeit von Volz (2006), neben den Längen- und Winkeldifferenzen sowie der Abweichung in der Anzahl der adjazenten Start- und Endknoten zwischen den Repräsentationen der Straßensegmente, auch die Vertex-Hausdorff-Distanz eingesetzt. In (Schlüter, 2001) werden außer Differenzen zwischen der Kompaktheit und Exzentrizität der Objekte auch die Hausdorff-Distanz, die symmetrische Differenz und die Turning-Funktion (siehe Anhang B.3.1, B.3.2 und B.4.1) als Komponente des Ähnlichkeitsvektors verwendet.

Somit wird der Unterschied zwischen den Objekten aufgrund von mehreren Merkmalen als ein einzelner Wert ausgedrückt (engl. „aggregated value“), wobei je kleiner diese Distanz wird, desto ähnlicher die Objekte sind. Andersrum, wenn der Wert 1 dem vollständigen Übereinstimmungsgrad zwischen den Objekten entspricht, so können die Differenzen bzw. Distanzen in (4.4) durch die direkt berechneten oder deren komplementären Ähnlichkeitsmaße, wie in (4.1), ersetzt werden. Solch eine Art der Berechnung wird auch gerne für die Aggregation der Qualitätsmaße verwendet und ist auch in ISO 19114 (2003) festgelegt. Dabei wird ein Qualitätsmaß als Erfüllungsgrad einer Bedingung bzw. Ähnlichkeitsgrad einem Soll-Wert betrachtet.

4.2. Klassifizierung der Objektmerkmale

Die Qualitätsbewertung der kartographischen Generalisierung kann mit dem Problem der Ähnlichkeitsschätzung verglichen werden, die in den Bereichen der Computervision und Bildverarbeitung wohl bekannt ist. Sie spielt eine zentrale Rolle bei der Automatisierung solcher Vorgänge wie bspw. Objekterkennung (engl. „object recognition“), Objektzuordnung (engl. „feature matching“) oder bildbasierte Suche innerhalb einer graphischen Datenbank (engl. „image retrieval“) und besteht darin, die Konformität von Objekten bezüglich bestimmter Eigenschaften festzustellen. Die Qualitätsbewertung hat auch zum Ziel, die Erscheinung der Objekte zu vergleichen. Dennoch liegt im Fokus dieser Aufgabe nicht die Ähnlichkeit bzw. der Unterschied zwischen Objekten, sondern wie gut ein generalisiertes Model im Vergleich zu seinem Original ist oder welcher Algorithmus sich unter gegebenen Voraussetzungen für die eine oder andere Anwendung besser eignen würde. D.h. es ist eher die weiterführende Interpretation der berechneten Ähnlichkeitswerte von Interesse, welche zu Qualitätsmaßen entwickelt werden müssen.

Dementsprechend stellen die in der Computervision verwendeten Objektcharakteristiken eine gute Grundlage für die Qualitätsbewertung der Generalisierung dar. Es gibt eine große Zahl verschiedener Charakteristiken, die in diesem Bereich zur Beschreibung geometrischer Objekteigenschaften eingesetzt werden können. Da im Rahmen dieser Arbeit lediglich die Geometrie eines Objekts in Betracht gezogen wird, soll auf solche Eigenschaften wie Farbe oder Textur nicht eingegangen werden. Allgemein kann die Geometrie eines Objekts aufgrund von vier Eigenschaften charakterisiert werden, die unterschiedliche Aspekte zum Ausdruck bringen. Dazu zählen Größe (z.B. Fläche und Umfang), Orientierung (Richtung der Ausdehnung), Lage/Position (z.B. Schwerpunkt) und Form (engl. "size", "orientation", "location", "shape"). Aus dem Grund, dass die isometrischen Transformationen (Skalierung, Rotation und Translation)

durch die Simplifizierung der Gebäudegrundrisse nicht explizit mit einbezogen sind, befasst sich diese Arbeit hauptsächlich mit dem Vergleich von Objekten aufgrund ihrer Form.

4.2.1. Objektrepräsentationen

Die übliche Klassifizierung von Charakteristiken bezieht sich auf die Art der Objektrepräsentation. Grundsätzlich kann ein Objekt sowohl bei der Raster- als auch bei der Vektordarstellung gemäß zwei Vorgehensweisen betrachtet werden. Bzw. das Objekt kann entweder ausschließlich durch dessen Umriss oder zusammen mit der Fläche, die diesen Umriss beinhaltet, repräsentiert werden. Diese zwei Repräsentationsarten werden entsprechend als kontur- und regionenbasiert bezeichnet.

Um diese zwei Repräsentationen mathematisch zu definieren, ist es hilfreich, die Standards für räumliche Daten zu betrachten. Nach dem sogenannten *Spatial Schema*, dass die Modellierung der Raumphänomene standardisiert, werden alle Objekte als topologische Punktmenge betrachtet (ISO 19107, 2003; ISO 19137, 2007). Die topologischen Räume stellen das Untersuchungsgebiet der mengentheoretischen Topologie dar, wobei die Punkte gemeinsam mit ihren Umgebungen betrachtet werden. Diese Umgebungen, oder auch Nachbarschaften, sind offene Punktmenge innerhalb eines beliebigen Abstandes um die betrachteten Punkte herum und werden in Anhängigkeit von der Dimensionalität des Raums als Intervall, Kreis oder Kugel in 1D, 2D und 3D entsprechend betrachtet (Andrae, 2009). Sei A eine Teilmenge des topologischen Raums, die das betrachtete Objekt bildet. Ein Punkt heißt *Berührungspunkt* oder *Adhärenzpunkt* von A , wenn jede Umgebung des Punkts komplett oder teilweise innerhalb dieser Menge liegt. Die Menge der gesamten Berührungspunkte ist als abgeschlossene Hülle oder Abschluss (engl. „closure“) von A genannt und wird mit \bar{A} bezeichnet. Die Punkte, deren Umgebungen vollständig durch die Menge A beinhaltet sind, bilden das sogenannte *Innere* (engl. „interior“) von A , während die Punkte mit der Umgebung, die sich teilweise außerhalb von A befinden, den Rand (engl. „boundary“) dieser Menge darstellen. Dementsprechend kann der Rand einer Menge als dessen Abschluss ohne das Innere, wie in (4.5), berechnet werden. Dadurch wird das Innere, welches eine offene Menge darstellt, auch oftmals als offener Kern der Menge genannt und durch $\overset{\circ}{A}$ bezeichnet. Die restlichen Punkte des betrachteten Raums, die nicht zum Abschluss von A gehören, bilden eine offene Untermenge und sind das sogenannte *Äußere* des Objekts (Bartsch, 2007; Camps et al., 2006; Querenburg, 1979).

$$\partial A = \bar{A} \setminus \overset{\circ}{A} \quad (4.5)$$

Auf diese Weise stellt jedes Objekt (außer den Punktgeometrien) eine unendliche und kompakte, d.h. beschränkte und abgeschlossene, Punktmenge dar, während die geometrischen Primitive als offene Mengen festgelegt werden. Diese Vorgehensweise ermöglicht einerseits, die Modellierung verschiedener geometrischen Primitiven zu vereinheitlichen und dadurch den Zusammenhang zwischen diesen aufzustellen. Andererseits erlaubt es eine mengentheoretische Definition zur Spezifizierung der räumlichen Objekteanalyse einzusetzen (Andrae, 2009).

Es gibt mehrere Möglichkeiten die beiden Repräsentationen zu modellieren, die je nach Anwendung gewählt und in die jeweils andere konvertiert werden können. Auf diese Weise kann der Rand eines Rasterobjekts durch den Kettencode dargestellt werden, dass eine sequenzielle Kodierung des Verlaufs der Randpixel ist. Weiterhin können die Darstellungen bspw. durch einen Segmentzug von geraden Linien (Polygonapproximation für die flächenhaften Objekte) oder Kurven wie die Approximation durch B-Splines eines Objekts erzeugt werden.

Die einfachste Art und Weise, eine Region darzustellen, ist das räumliche Belegungsfeld (engl. "spatial occupancy array"), das die Zugehörigkeit der Bildpunkte bzw. Pixel zu einem Objekt ausdrückt. Im binären Fall, zu dem auch die Vektordarstellung gezählt wird, werden die Punkte, die nicht zum Objekt gehören (das Äußere), mit 0 und die Regionen bildenden Punkte (der Objektabschluss) mit 1 codiert (Ballard and Brown, 1982; Burger and Burge, 2006). Zur Steigerung der Effizienz dieser Darstellung kann eine Baumstruktur zur Speicherung verwendet werden. Darauf folgend kann eine Region durch ein Skelett dargestellt werden, das durch die Mittelachsentransformation generiert und weiter hin zur Graphenrepräsentation entwickelt werden kann. Somit besteht ein Skelett der Punktemenge einer Region aus Positionen, welche die gleiche minimale Distanz zu mindestens zwei verschiedenen Punkten auf dem Objektrand aufweisen (Gonzalez and Woods, 2002; Sonka et al., 1999). Dabei ist das Ergebnis von der gewählten Distanzberechnung abhängig (siehe Anhang A).

Zu einer besonderen Art der Objektrepräsentation gehören die Signaturen, die eine eindimensionale Interpretation der Geometrie eines Objekts darstellen und sich sowohl auf die Objektkontur als auch auf die Objektfläche beziehen können. Diese Darstellungen werden als funktional bezeichnet und ausführlicher in Anhang B.4 erläutert.

Allgemein wird die externe Präsentation, oder Randlepräsentation, hauptsächlich für die Beschreibung der Form eines Objekts eingesetzt, während die interne Repräsentation meistens für die Darstellung solcher regionalen Eigenschaften wie Farbe oder Textur notwendig ist (Gonzalez and Woods, 2002). Dabei stellen die aufgezählten Darstellungen nur einige Möglichkeiten dar, die sich zur geometrischen Modellierung von Objekten anbieten. Sie alle verfügen über verschiedene Eigenschaften und liefern somit unterschiedliche Informationen über die Form eines Objekts. In Abhängigkeit von der gewählten Repräsentation können die Eigenschaften eines Objekts durch die bestimmten Charakteristiken beschrieben werden, die als Merkmale (engl. "features") oder in Anlehnung an den englischen Begriff "description" auch oftmals als Deskriptoren genannt werden. Aufgrund dieser Kenngrößen kann ein Objekt identifiziert und mit einem bestimmten Genauigkeitsgrad rekonstruiert werden (Morse, 2000).

4.2.2. Berechnungsarten der Objektmerkmale

Dennoch kann die Unterteilung der Objektmerkmale in kontur- und regionenbasiert für manche Zwecke, wie z.B. für den Formvergleich von Objekten, infolge deren Uneindeutigkeit nicht geeignet sein, da manche Charakteristiken, wie z.B. Kompaktheit oder Ausdehnung bzw. Exzentrizität, aufgrund beider Repräsentationen berechnet werden können. Diese Tatsache führt zu widersprüchlichen Klassifikationen in verschiedenen Literaturquellen, was für Verwirrung sorgen kann. Die unterschiedlichen Klassifikationen der Formrepräsentationen und die entsprechenden Deskriptoren von Objekten aus (Jain, 1989; Mehre et al., 1997), sowie (Samma and Salam, 2009) können miteinander verglichen werden. Unstimmig ist die relevante Literatur weiterhin in der Bezeichnung der geometrischen Charakteristiken. Dabei werden unterschiedlich berechnete Charakteristiken mit demselben Begriff bezeichnet. Bspw. kann unter der Ausdehnung eines Objekts gleichzeitig die Länge dessen Hauptachse oder die Orientierung gemeint sein. Ein anderes Beispiel stellt die Definition des Objektdiameters dar, das als die maximale Sehne oder auch als der Durchmesser des umschließenden Kreises betrachtet werden kann. Wiederum kann auch ein und dieselbe Charakteristik in verschiedenen Quellen anders genannt werden, wie im Fall der Kompaktheit und Kreisförmigkeit, die mathematisch gleich formuliert sind.

Aus diesen Gründen wurde eine neue Klassifizierung der Charakteristiken zur Schätzung der Formähnlichkeit von Objekten erarbeitet, welche eine Unterscheidung auf Basis der Berechnungsart trifft und damit eine eindeutige Unterteilung gewährleistet. Diese Klassifizierung ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Dementsprechend kann die Erscheinung eines Objekts aufgrund der eigentlichen Formmerkmale, d.h. geometrisch charakterisiert oder durch eine Funktion repräsentiert werden. Des Weiteren kann der auf den geometrischen Merkmalen basierte Vergleich von Objekten in Anlehnung an (Steiniger and Weibel, 2007; Volz, 2006) in komparativ und direkt unterteilt werden. Allgemein wird die Ähnlichkeitsbestimmung von Objekten, die ausschließlich anhand der Form durchgeführt wird, als morphologiebasiert bezeichnet.

Die Formmerkmale, die in Abbildung 4.1 zur ersten Klasse gehören, dienen zum komparativen Vergleich von Objekten. Dabei erfolgt der Vergleich durch die Gegenüberstellung der entsprechenden Charakteristiken. Diese Vorgehensweise ermöglicht es, die allgemeinen Tendenzen von Objektveränderungen festzustellen. Zu dieser Gruppe gehören z.B. diejenigen Charakteristiken, die durch die Projektion eines Objekts auf eine Referenzfigur geschätzt werden. Sie werden im Anhang B.1 ausführlich beschrieben. Die statistisch berechneten Charakteristiken stellen eine weitere Art von Merkmalen dar, die zum komparativen Formvergleich von Objekten eingesetzt werden können (siehe Anhang B.2).

Die zweite Klasse impliziert dagegen den direkten Vergleich zweier Objekte, was mithilfe von Distanzberechnungen durchgeführt werden kann. Dabei werden die lokalen Formunterschiede identifiziert. Genau diese Gruppe von Charakteristiken stellt einen Eckpfeiler dieser Arbeit dar, da die auf diese Weise durch die Generalisierung entstehenden Problemstellen exakt erkannt werden können. Die vorhandenen mathematischen Grundlagen zur Berechnung von Distanzen werden in Anhang B.3 präsentiert.

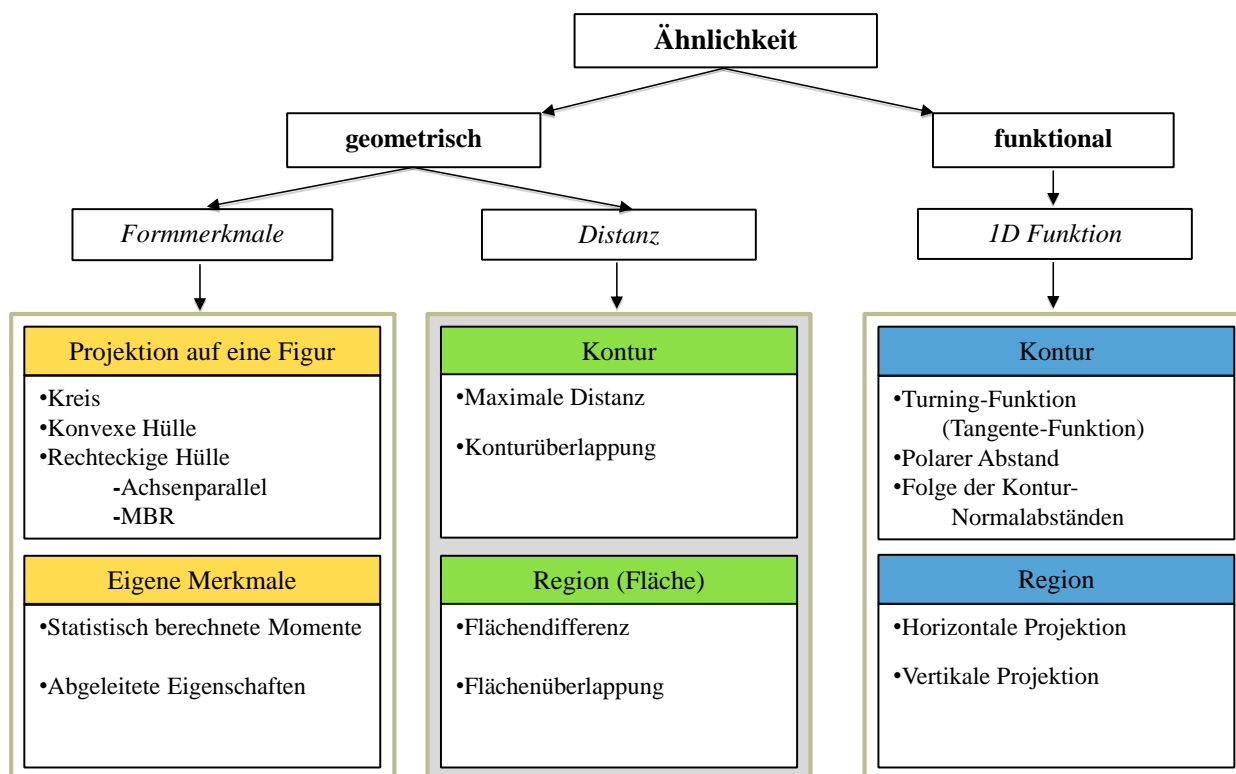


Abbildung 4.1: Klassifizierung der Objektmerkmale nach der Berechnung

Die Charakteristiken aus der letzten Gruppe, die als funktionaler Vergleich bezeichnet wird, ermöglichen den Vergleich von 2D-Objekten aufgrund deren Repräsentation als 1D-Funktionen. Die Berechnung und Eigenschaften dieser Merkmale werden in Anhang B.4 vorgestellt

5 Qualitätsbewertung der Generalisierung

Dieses Kapitel widmet sich unmittelbar der Qualität der Generalisierung, deren Bewertung auf den oben erklärten Prinzipien der Ähnlichkeitsschätzung basiert. Im ersten Abschnitt werden die existierenden Ansätze zur Qualitätsevaluierung des Generalisierungsprozesses, sowie die Generalisierungsergebnisse präsentiert und die zu diesem Zweck verwendeten Qualitätscharakteristiken diskutiert. Im zweiten Teil wird insbesondere die Qualität der generalisierten Gebäudegrundrisse betrachtet und die Verwendung einzelner Charakteristiken für diesen bestimmten Objekttyp erörtert.

5.1. Existierende Ansätze

Die Identifizierung und Klassifikation der Objekteigenschaften ist ein wichtiger Schritt für die Bewertung der Generalisierungsqualität. Da die Generalisierung ein sehr komplexer Prozess ist, bei dem mehrere alternative Generalisierungsergebnisse generiert werden können, ist es nötig, diese charakterisieren zu können. Auf diese Weise können bestimmte Objekteigenschaften bei einigen Generalisierungsansätzen beibehalten und bei anderen vernachlässigt werden. Die entsprechenden Eigenschaften eines Objekts können zum einen für die Festlegung der Qualitätseinschränkungen verwendet werden, so dass die Generalisierungsergebnisse kontrolliert und darauf folgend verbessert werden können, ein sogenannter Soll-Ist-Vergleich. Zum anderen können die Objekteigenschaften für den Vergleich der Generalisierungsalternativen eingesetzt werden, um diejenigen zu identifizieren, welche die Anforderungen einer bestimmten Anwendung besser erfüllen. Die Untersuchung existierender kartographischer Einschränkungen und die darauf basierende Evaluierung der Generalisierung werden im ersten Abschnitt diskutiert. Der zweite Abschnitt widmet sich den holistischen Ansätzen zur Bewertung der Generalisierungsergebnisse auf verschiedenen Detaillierungsstufen.

5.1.1. Einschränkungsbasierte Evaluierung im Rahmen von EuroSDR

Die existierenden kartographischen Einschränkungen verschiedener nationalen Vermessungsbehörden, hier mit NMCA abgekürzt für den englischen Begriff "National Mapping and Cadastral Agency", wurden im Rahmen der EuroSDR (European Spatial Data Research Organisation) umfassend untersucht. Der erste Teil dieser Studie, die in (Burghardt et al., 2007) präsentiert wurde, widmet sich der Formalisierung der kartographischen Einschränkungen am Beispiel der vier NMCA: ICC¹ (Katalonien), IGN² (Frankreich), OS³ (Großbritannien) und TD Kadaster⁴ (Niederlande). Die Untersuchung konzentriert sich hauptsächlich auf Maßstäbe von 1:50.000 und kleiner.

Alle vorhandenen Einschränkungen werden durch die Anwendung dreier Klassifikationen zusammengefasst, um diese zahlenmäßig und inhaltlich zu vergleichen. Die erste Klasse wird durch den Klassifikator „Einschränkungstyp“ gebildet (vgl. Abbildung 2.2). Eine weitere Klassifikation berücksichtigt den Objekttyp, wobei solche Objektklassen wie Gebäude und Landnutzung, Straßen und Bahnlinien, hydrographisches Netz und Relief, isolierte punkt-, linien- und

¹ Institut Cartogràfic de Catalunya

² Institut Géographique National

³ Ordnance Survey

⁴ Topografische Dienst Kadaster

flächenförmige Objekte und Küstenlinien festgelegt werden. Als letztes wird zwischen Einschränkungen unterschieden, die sich auf Einzelobjekte, Objektpaare oder Objektgruppen beziehen.

Als Ergebnis dieser Untersuchung hat sich herausgestellt, dass die kartographischen Einschränkungen bei allen NMCA nicht einfach geometriebezogen spezifiziert sind, sondern in erster Linie vom semantischen Objekttyp gemäß der zweiten Klassifizierung abhängig sind. Dabei unterscheiden sich die Spezifikationen in Bezug auf die Anzahl und Granularität bzw. dem Formalisierungsgrad der Einschränkungen ziemlich stark, was die Prioritäten der einzelnen Länder widerspiegelt. Zusammengefasst betrifft der größte Anteil der Einschränkungen die Erhaltung der Lesbarkeit bezogen auf Einzelobjekte, wobei solche Objektklassen wie Gebäude, Landnutzung und Straßen am besten abgedeckt sind.

Der zweite Teil der von der EuroSDR durchgeführten Untersuchung befasst sich mit der Frage der Evaluierung der Generalisierungsergebnisse aufgrund von existierenden Einschränkungen (Burghardt et al., 2008). Zu diesem Zweck wurden vier Testgebiete sowohl durch vier Generalisierungssysteme prozessiert, als auch manuell generalisiert. Die Generalisierungsergebnisse wurden nach denselben Spezifikationen erzeugt wie im ersten Teil der Untersuchung. Da nicht alle Einschränkungen auf einmal erfüllt werden konnten, wurden für jedes Testgebiet zehn alternative Lösungen generiert, deren Evaluierung die folgenden Fragen zu beantworten hatten:

1. Inwieweit trifft jedes Ergebnis die Spezifikationsanforderungen?
2. Wie unterscheiden sich die alternativen Lösungen?
3. Wie unterschiedlich erfüllen die alternativen Lösungen die Spezifikationen und wie lässt sich dies begründen?

Zur Lösung dieser Fragen wurden drei parallele Evaluierungen durchgeführt, deren Ergebnisse sich gegenseitig stützen.

- die Evaluierung durch Experten wurde für die drei Kategorien Einzelobjekt, Objektpaar und Objektgruppe jeweils für alle Objekttypen, die im ersten Teil der Untersuchung festgelegt wurden, durchgeführt. Der Erfüllungsgrad der dafür ausgewählten Einschränkungen wurde qualitativ mit "sehr schlecht", "schlecht", "gut" und "sehr gut" bewertet. Daraufhin wurden die Experten gebeten, die schlecht generalisierten Stellen einer Karte zu kommentieren, um die Interaktion mehrerer Einschränkungen in Betracht zu ziehen.

- die automatisierte einschränkungsbasierte Evaluierung wurde für die drei gewählten Lesbarkeitsbedingungen durchgeführt. Darüber hinaus wurden die Ergebnisse dieser Evaluierung statistisch zusammengefasst, um den umfassenden Überblick über den gesamten Datensatz zu bekommen. Dabei wurden solche Charakteristiken wie die Anzahl unveränderter Objekte, die Anzahl der Fehlerfälle, sowie das Maß der durchschnittlichen Verletzungen einer Einschränkung und die durchschnittliche Streuung um den vorgegebenen Schwellwert berechnet

- die Evaluierung zum Vergleich alternativer Lösungen bestand in der quantitativen und qualitativen Analyse. Zuerst wurden die Gesamtwerte für jeden Objekttyp berechnet, wie die Anzahl kleiner Objekte, die kumulative Länge der Netzwerke und die Fläche der polygonförmigen Objekte. Diese Makroevaluierung hatte zunächst zum Ziel, die unterschiedlichen Lösungen quantitativ zu vergleichen. Der begleitende visuelle Vergleich ermöglichte, die allgemeinen Trends in den Veränderungen der Informationen zu entdecken, die quantitativ näher untersucht werden können. Die darauffolgende qualitative Analyse bezweckte sowohl die Generalisierungsergeb-

nisse nach dem Übereinstimmungsgrad mit der Spezifikation einzustufen, als auch die Spezifikationen selbst nach deren Flexibilität und der gelungenen Übertragung in das System zu bewerten.

Beide Teile der durch EuroSDR ausgeführten Untersuchung werden in (Stoter et al., 2009) zusammengefasst. Infolgedessen werden ca. 250 kartographische Einschränkungen der vier nationalen Vermessungsbehörden in einen generischen Satz harmonisiert. Einerseits ermöglicht dies, ähnliche Situationen bei der Generalisierung durch dieselben Einschränkungen zu beschreiben. Andererseits können dadurch die alternativen Testergebnisse für dieselben Einschränkungen miteinander verglichen werden. Die 45 harmonisierten generischen Einschränkungen für die Generalisierungsergebnisse unterteilen sich wie folgt: 21 für die Einzelobjekte, 11 für Objekt-paare und 13 für Objektgruppen. Im Hinblick auf die vorliegende Arbeit beinhalten die Einschränkungen für Einzelobjekte die folgenden geometrischen Aspekte:

- Mindestgrößen
 - u.a. Fläche
- Position
- Orientierung
- Form
 - Rechtwinkligkeit
 - Konkavität
 - Ausdehnung

5.1.2. Holistische Ansätze zur Qualitätsbewertung der Generalisierung

Ein ganzheitlicher Ansatz für die Qualitätsbewertung der Generalisierung auf den verschiedenen Detaillierungsniveaus wird in (Bard and Ruas, 2004) vorgeschlagen. Dabei beziehen sich die Mikro-, Meso-, und Makroebenen auf die Auswertung einzelner Objekte, Objektgruppen und ganzer Datensätze (siehe Abschnitt 2.2.2). Hier wird die Entwicklung einer Charakteristik in Abhängigkeit von dem Ausgangswert und Maßstab aufgrund einer Funktion modelliert. In Übereinstimmung mit den Lesbarkeitseinschränkungen müssen einige Charakteristiken wie Position, Orientierung und Form eines Objekts erhalten bleiben und andere wie Größe, Granularität und Nachbarschaft zwischen den Objekten verändert werden. Dementsprechend unterscheidet man bei den Entwicklungsfunktionen (engl. „evolution function“) zwischen der Erhaltungsfunktion und den Veränderungsfunktionen Simplifizierung, Amplifikation und Schwelleneffekt für die Modifizierung der Charakteristiken. Dabei stellen die tatsächlichen Entwicklungsfunktionen oftmals eine Kombination dieser typischen Funktionen dar, die empirisch festgestellt wurden. Auf diese Weise wird der tatsächliche Wert einer Charakteristik mit dem vorberechneten Funktionswert verglichen, welcher als Nennwert betrachtet wird.

Zur Abgrenzung zulässiger Generalisierungslösungen wird um die Entwicklungsfunktion ein Toleranzbereich gelegt, welcher in Abbildung 5.1 a) dargestellt ist. Um die akzeptablen Ergebnisse besser diskriminieren zu können, wird darüber hinaus innerhalb des Toleranzbereiches noch ein Sensitivitätsbereich (engl. „sensitivity“) definiert. Dessen Breite basiert auf der graphischen Mindestgröße (siehe Abschnitt 2.2), bei der unterschiedliche Generalisierungslösungen als visuell äquivalent wahrgenommen werden (siehe Abbildung 5.1 b)). Beide Werte, die der Toleranz und der Sensitivität, sind vom Endmaßstab und den Nutzeranforderungen abhängig. Letztendlich werden die Differenzen zwischen dem Nennwert und dem tatsächlichen Wert einer bestimmten Charakteristik anhand der Interpretationsfunktion (engl. „interpretation function“), wie

in Abbildung 5.1 c), qualifiziert. Die Unterteilung in die vier Qualitätsklassen „gut“, „eher gut“, „eher schlecht“ und „schlecht“ soll einem besseren Verständnis der Ergebnisse dienen.

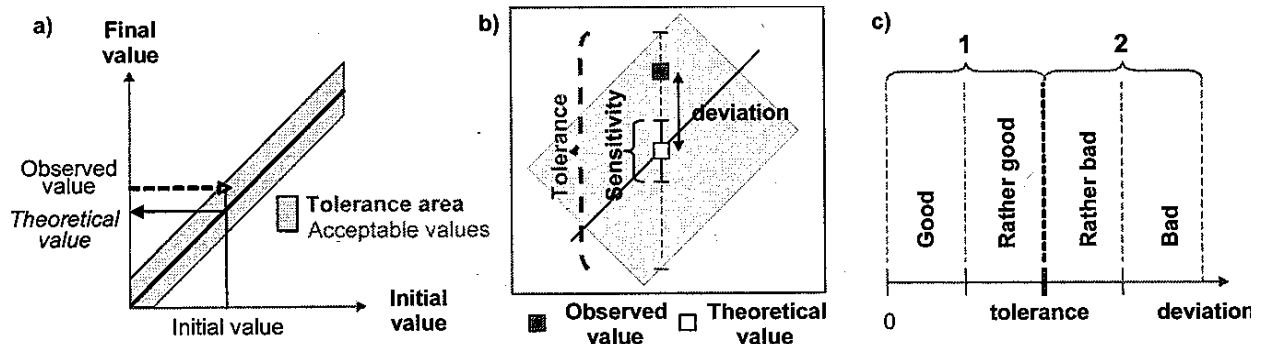


Abbildung 5.1: a) Toleranzbereich, b) Sensitivität und c) qualitative Interpretation (aus (Bard and Ruas, 2004))

Bei der Aggregation von Qualitätscharakteristiken wird deren Wichtigkeit für jeden bestimmten Objekttyp berücksichtigt. Bspw. werden die Charakteristiken der einzelnen Gebäudegrundrisse, was der Evaluierung auf der Mikroebene entspricht, wie folgt in drei Klassen unterteilt: wichtig (Größe und Form), mittelwichtig (Orientierung, Granularität) und weniger wichtig (Position). Somit werden die qualitativen Werte in Abhängigkeit von der Wichtigkeit einer Charakteristik, die sie beschreiben, gewichtet (siehe Abbildung 5.2 a)). Der globale Wert der Generalisierungsqualität ist als die Summe aller Werte der Charakteristiken berechnet und kann nach der empirisch abgeleitete Interpretationsfunktion, wie bei den einzelnen Charakteristiken, in vier Qualitätsklassen eingestuft werden (siehe Abbildung 5.2 b)).

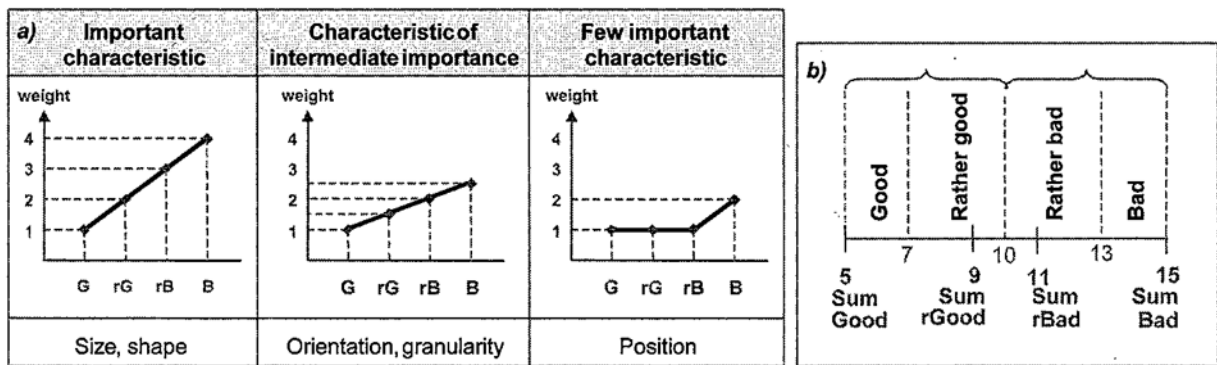


Abbildung 5.2: a) Gewichtung der Charakteristiken für Gebäudegrundrisse, b) Interpretationsfunktion (aus (Bard and Ruas, 2004))

Ein ähnliches Konzept, die Generalisierungsqualität auf verschiedenen Detaillierungsniveaus zu evaluieren, wird in (Frank and Ester, 2006) präsentiert. Jedoch weist diese Klassifizierung einige inhaltlichen Unterschiede im Vergleich zu der vorherigen Arbeit auf. Hier wird die Qualität der Generalisierung basierend auf den Ähnlichkeitscharakteristiken hinsichtlich Form (engl. „shape similarity“), Lage (engl. „position similarity“) und semantischen Inhalt (engl. „semantic content similarity“) bewertet. Auf der Objektebene wird die Form des originalen und generalisierten Grundrisses aufgrund deren Turning-Funktion verglichen (siehe Anhang B.4.1). Die Ähnlichkeit in der Position eines Objekts wird vor und nach der Generalisierung relativ zu dessen Nachbarn betrachtet. Sie wird als die durchschnittliche Veränderung des Abstandes zwischen dem Objekt und dessen unmittelbaren Nachbarn, welche mit Hilfe des Voronoi-Diagramms identifiziert werden, berechnet. Die letzte Charakteristik bewertet die Veränderungen in der Verteilung der semantischen Informationen innerhalb einer Karte. Zu diesem Zweck wird die Voronoi-Entropie

VE geschätzt, welche die Wichtigkeit des Einflusses jedes einzelnen Objekts auf die ganze Karte zum Ausdruck bringt und auf der Fläche der entsprechenden Voronoi-Zelle basiert. Dementsprechend wird die Voronoi-Entropie für die gesamte Karte wie in (5.1) berechnet:

$$VE(Map_A) = \sum_{i=1}^k (P_i \cdot \ln(P_i) \cdot V_i) \quad (5.1)$$

Hier steht P_i für den Anteil der Objekte einer Klasse k_i zu der Gesamtzahl an Objekten auf einer Karte und V_i ist der Flächenanteil aller Voronoi-Zellen der Objekte dieser Klasse. Letztendlich wird die Ähnlichkeit des semantischen Inhaltes des originalen und generalisierten Datensatzes als Verhältnis zwischen der minimalen und maximalen Voronoi-Entropie der zu vergleichenden Karten wie in (5.2) geschätzt.

$$SCS(Map_A, Map_B) = \frac{MIN[VE(Map_A), VE(Map_B)]}{MAX[VE(Map_A), VE(Map_B)]} \quad (5.2)$$

Die Ähnlichkeitsmessungen insbesondere für die Qualitätsbewertung der generalisierten polygonalen Objekte wird in (Podolskaya et al., 2007) vorgeschlagen und am Beispiel von Gebäudegrundrissen getestet. Diese Qualitätscharakteristiken (engl. „quality index“) QI_i werden als normalisierte Differenzen zwischen den Werten der entsprechenden Eigenschaften des originalen und generalisierten Objekts wie in (4.3) berechnet und gemäß (4.1) in Ähnlichkeitsmaße umgerechnet (siehe Formel (5.3)):

$$QI_i = 1 - \frac{|F_{i,A} - F_{i,R}|}{\max(F_{i,A}, F_{i,R})} \quad (5.3)$$

Dabei sind $F_{i,A}$ und $F_{i,R}$ der tatsächliche Wert und die Bezugsgröße für eine bestimmte Eigenschaft F_i . Auf diese Weise werden die polygonalen Objekte vor und nach der Generalisierung mittels der folgenden vier Charakteristiken verglichen: Knotenreduktion, Veränderungen von Objektfläche, Objektumfang und Turning-Funktion. Die Aggregation der einzelnen Qualitätscharakteristiken erfolgt in den Ansätzen von (Frank and Ester, 2006; Podolskaya et al., 2007) nach (4.4) als gewichtete Summe.

Um Abschnitt 5.1 abzuschließen, kann festgehalten werden, dass bei der Evaluierung der Generalisierung zwischen zwei Vorgehensweisen zu unterscheiden ist. Wie in Abschnitt 2.2.2 erläutert, wird die Qualitätsbewertung der Generalisierungsergebnisse als Schätzung des Veränderungsgrads eines Objekts betrachtet. Somit können die Qualitätscharakteristiken aufgrund des unmittelbaren Vergleichs des originalen und generalisierten Grundrisses oder durch die Differenz ihrer sich entsprechenden Eigenschaften geschätzt werden. Alternativ können die tatsächlichen Werte, die einen generalisierten Grundriss charakterisieren, mit Nennwerten verglichen werden, die die Entwicklung dieser bestimmten Eigenschaft mit der Veränderung des Maßstabs widerspiegeln.

Die meisten kartographischen Einschränkungen sowie die vorhandenen Ansätze betreffen Kartenwerke in den Maßstäben kleiner 1:10.000. Die Generalisierung für die Erzeugung von Kartenwerken in kleinen Maßstäben ist durch ein hohes Abstraktionsniveau charakterisiert. Für Gebäude, die hinsichtlich des Maßstabes zu klein sind, lohnt es sich nicht deren Form zu simplifizieren. Aus diesem Grund werden solche Objekte durch ein vordefiniertes Symbol ersetzt, welches im Fall des Gebäudegrundrisses am besten durch ein Rechteck repräsentiert wird (Regnauld

and McMaster, 2007). Dabei sollen solch globale Eigenschaften wie Position, Orientierung und Größe nach Möglichkeit mit dem Original übereinstimmen. Was die Form der beiden Objekte angeht, ergibt es nicht viel Sinn, den Verlauf deren Konturen in Einzelheiten zu vergleichen. Dafür eignen sich eher die allgemeinen Formcharakteristiken wie Ausdehnung oder Konkavität, sowie die Formcharakteristiken aus (Bard and Ruas, 2004) und (Stoter et al., 2009).

Was die größeren Maßstäbe angeht, so ist die vereinfachte Form eines Objekts immer noch gut erkennbar. Dabei ist die Turning-Funktion die einzige aus den in Abschnitt 5.1 diskutierten Charakteristiken, die zur Beurteilung der lokalen Veränderung im Konturverlauf eines Objekts verwendet wird. Auf verschiedene Aspekte zur Charakterisierung von generalisierten Gebäudegrundrissen wird im nächsten Abschnitt eingegangen.

5.2. Besonderheiten beim Vergleich von Gebäudegrundrissen

In diesem Kapitel werden einige Charakteristiken diskutiert, die zum Vergleich der Form, Lage und Orientierung der Gebäudegrundrisse üblicherweise verwendet werden. Dabei wird in die Spezifik dieser Objektklasse und deren Generalisierung eingegangen, um die Eignung dieser Charakteristiken für die Evaluierung der Generalisierungsergebnisse zu überprüfen. Dabei wird unter den Besonderheiten der Generalisierung der Gebäudegrundrisse die Erfüllung solcher Bedingungen wie Rechtwinkligkeit, Kollinearität und Parallelität gemeint.

5.2.1. Form (Turning-Funktion)

Der Formvergleich zweier Objekte kann anhand der Überlagerung ihrer Turning-Funktionen durchgeführt werden. Als Ähnlichkeitscharakteristik dient in diesem Fall der Flächenbetrag zwischen den beiden Funktionskurven, der als symmetrische Differenz der Funktionswerte betrachtet werden kann. Wie im vorherigen Abschnitt diskutiert, wird die Turning-Funktion auch für die Evaluierung der Generalisierungsergebnisse eingesetzt, insbesondere für den detaillierten Formvergleich einzelner Objekte auf der Mikroebene.

Einer der größten Vorteile der Turning-Funktion besteht in deren Translationsinvarianz. Diese Eigenschaft ist insbesondere nützlich, wenn ein Objekt infolge der Generalisierung durch die Verdrängung verschoben wird. Die einzige Schwierigkeit dabei ist, einen Referenzpunkt zwischen den beiden Objekten zu bestimmen. In Abbildung 5.3 a) und b) werden auf der linken Seite der originale und generalisierte Grundriss gezeigt, während deren Turning-Funktionen rechts daneben abgebildet sind. Als Referenzpunkt wird die linke obere Ecke genommen, die mit einem roten Kreis markiert ist. Die Überlappung beider Turning-Funktionen zeigt eine ziemlich gute Übereinstimmung der Objektformen (siehe Abbildung 5.3 c) rechts) wobei die tatsächliche räumliche Überlagerung der Objekte in Abbildung 5.3 c) links zu sehen ist.

Bei der Überlagerung der Turning-Funktionen des originalen (rot) und generalisierten (blau) Grundrisses sind die allgemeinen Tendenzen der Objektveränderung infolge der Generalisierung deutlich erkennbar. So sind z.B. der Seitenversprung auf der oberen Kante und die zwei Seitenversprünge auf der unteren Kante klar zu sehen, die durch die Simplifizierung eliminiert werden. Dennoch ist es schwierig, die tatsächliche Kontur- und Flächenüberlappung allein aus dem Vergleich der beiden Turning-Funktionen zu beurteilen. Bspw. werden die kollinearen, gleich ausgerichteten Objektseiten laut dieser Funktion übereinander liegen. Obwohl das Objekt sich durch diese Funktion genau rekonstruieren lässt, kann bei dem Vergleich der Funktionen der

räumliche Versatz zwischen den kollinearen Kanten nicht erkannt werden, wie es bei dem Versprung auf der oberen Kante des betrachteten Objekts der Fall ist. Dieser ist in Abbildung 5.3 c) sowohl auf dem originalen Grundriss als auch auf der Turning-Funktion durch die zwei blauen Kreuze markiert.

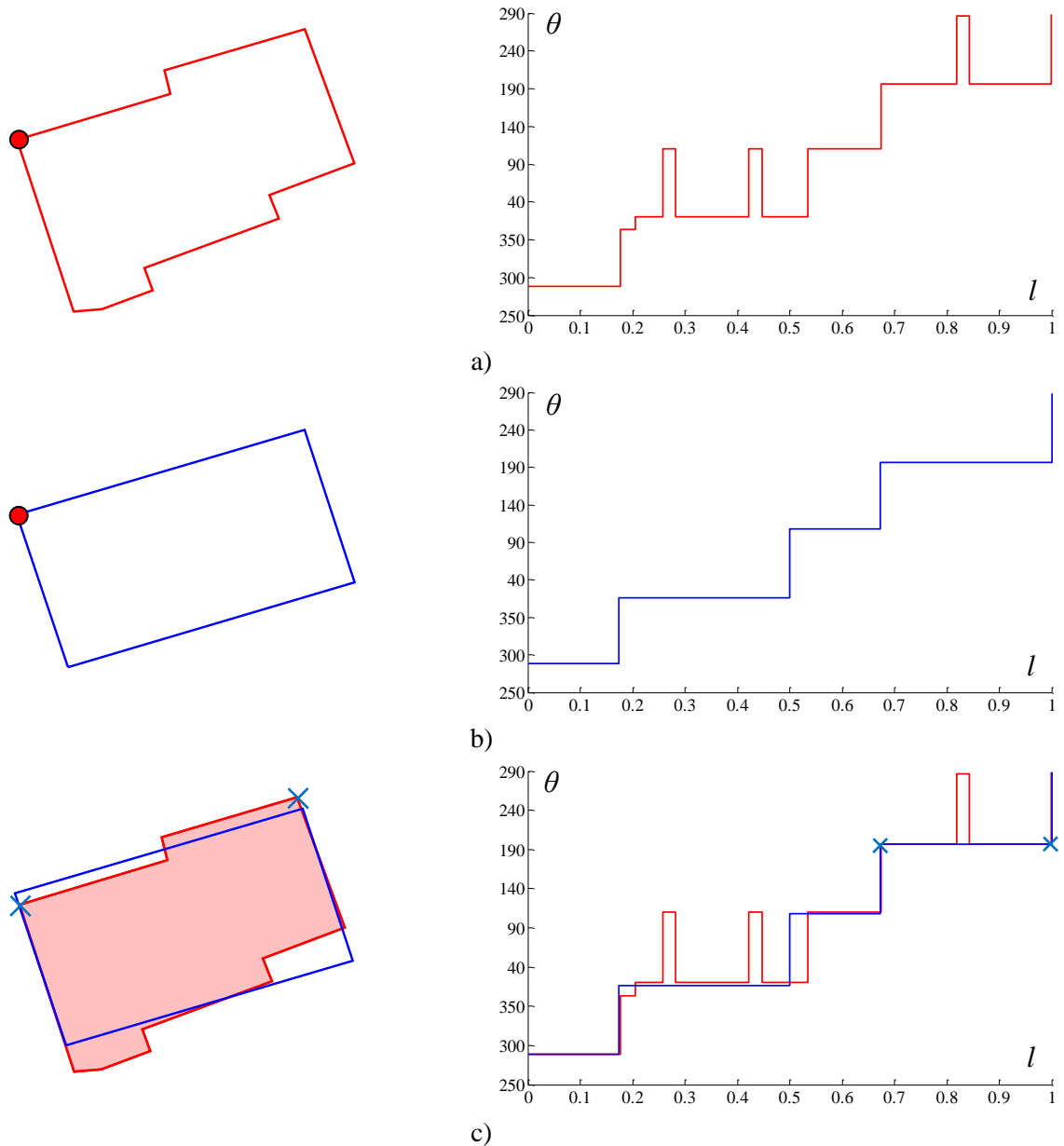


Abbildung 5.3: a) Turning-Funktion des originalen Grundrisses, b) des generalisierten Grundrisses und c) Vergleich zweier Turning-Funktionen

Auf diese Weise können die zwei zu vergleichenden Turning-Funktionen Übereinstimmungen an Stellen aufweisen, wo die Konturen räumlich unterschiedlich verlaufen oder umgekehrt Unterschiede aufzeigen, wo keine sind. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn der Umfang beider Objekte unterschiedlich ist. Dabei kann der Übereinstimmungsgrad zweier Turning-Funktionen auch von der Wahl des Referenzpunktes abhängen. Abbildung 5.4 a) und b) zeigen zwei verschiedene Überlagerungen derselben Turning-Funktionen, die jedoch unterschiedliche Anfangspunkte haben. Diese sind jeweils mit einem roten Punkt markiert.

Das erste, was bei dem Vergleich der Turning-Funktionen in Abbildung 5.4 a) und b) auffällt, ist, dass der Flächenunterschied zwischen den Funktionswerten im zweiten Fall größer ist, wobei es sich geometrisch um dieselben Objekte mit derselben räumlichen Überlappung handelt. Dies ist durch die unterschiedliche Länge der Objektkonturen bedingt, da der Umfang eines generalisierten Grundrisses infolge der Simplifizierung meistens kürzer wird. Dabei können solche architektonische Elemente eines Grundrisses wie Vor-, Ein- und Seitenversprünge als Rauschen in Bezug auf die Funktion des vereinfachten Objekts betrachtet werden, deren Auswirkung auf die ganze Funktionslänge bei der Skalierung verteilt wird. Als Folge entstehen unterschiedliche Überlappungen der Turning-Funktionen in Abhängigkeit des Referenzpunktes und die in der Wirklichkeit übereinstimmenden Punkte sind bei der Überlagerung der Funktionen versetzt, wie es mit den blauen Kreuzen angezeigt wird.

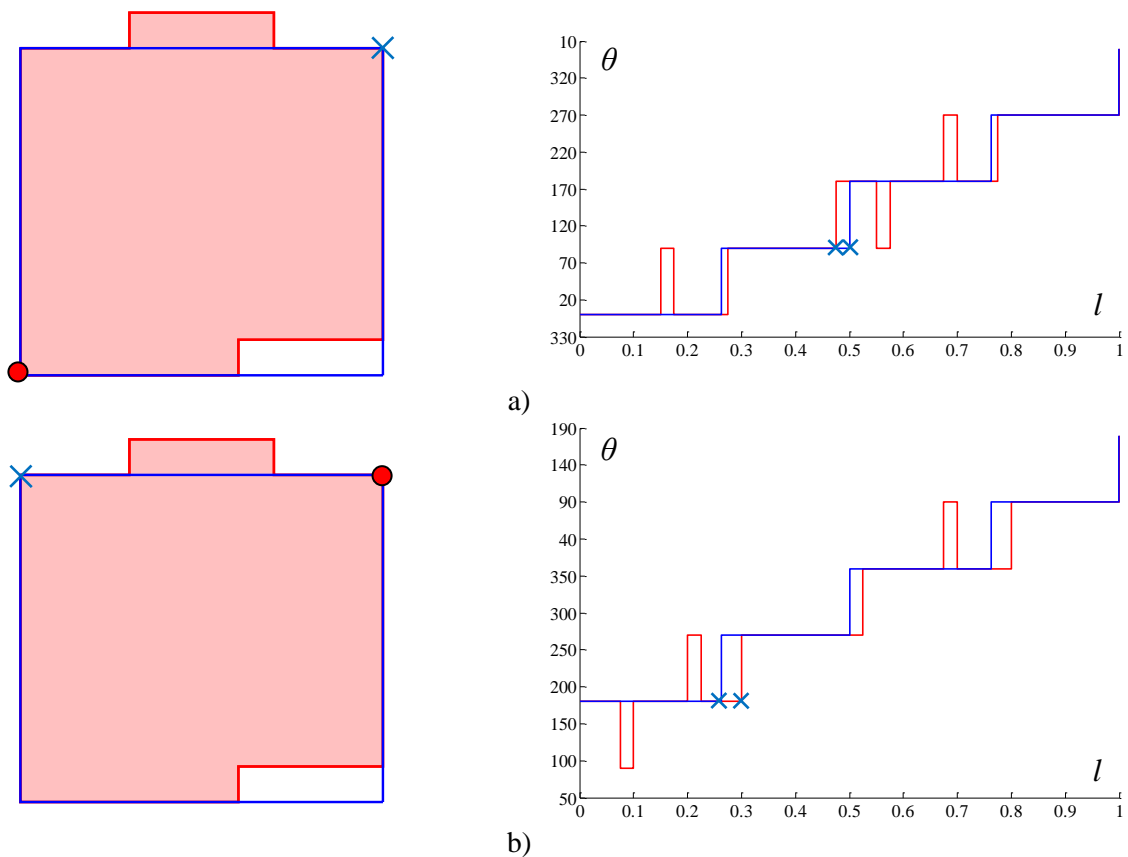


Abbildung 5.4: Vergleich zweier Turning-Funktionen in Abhängigkeit von der Wahl des Referenzpunktes (roter Kreis)

Eine Lösung dieses Problems wird in (Latecki et al., 2003) vorgeschlagen, wobei die übereinstimmenden Segmente bzw. Segmentzüge, die in dieser Arbeit als maximale konvexe Bögen bezeichnet sind, getrennt miteinander verglichen und zu diesem Zweck auf dasselbe Intervall skaliert werden. Dennoch können im Fall der Evaluierung der Generalisierungsergebnisse, wobei die Veränderungen eines Objekts bewertet werden müssen, diese Übereinstimmungen nicht immer eindeutig festgestellt werden.

Zusammenfassend können aufgrund der Turning-Funktionen die allgemeinen Tendenzen des Konturverlaufs zweier Objekte verglichen werden, was besonders gut für die Objekterkennung oder Objektsuche funktioniert. Hier muss lediglich ein binäres Ergebnis rauskommen, nämlich ob die betrachteten Objekte ähnlich sind oder nicht. Bei der Verwendung der Funktion für die Evaluierung von Unterschieden zwischen zwei Gebäudegrundrissen, d.h. wenn die Unterschiede

quantitativ geschätzt werden müssen, treten einige Probleme auf. Die größten Schwierigkeiten sind meistens durch die unterschiedliche Konturlänge der Objekte bedingt und bestehen in der Wahl des Referenzpunktes, so wie in der Identifizierung der übereinstimmenden Konturteile. Allgemein betrachtet stellt der Umfang eines Objekts eine unzuverlässige Charakteristik dar, da diese infolge der Generalisierung meistens kürzer wird und der Idealwert unbekannt ist.

5.2.2. Position

Allgemein betrachtet sind die statistisch berechneten Merkmale sehr empfindlich gegenüber minimalen Veränderungen an der Objektkontur. Dies muss dahingehend bei der Qualitätsbewertung berücksichtigt werden, da infolge der Generalisierung Formveränderungen an den Objekten praktisch unvermeidlich sind. Die Schwierigkeiten die dabei vorkommen können sind im Folgenden detailliert erläutert. Für die Anschaulichkeit der Ergebnisse sind die Approximationsellipsen (siehe Anhang B.2.3) der zu vergleichenden Objekte etwas verkleinert abgebildet, wobei das Größenverhältnis zwischen der Haupt- und Nebenachse, sowie die Lage des Schwerpunktes, der sich im Schnittpunkt beider Objektachsen befindet, beibehalten bleiben.

In Abbildung 5.5 werden in blau die drei alternativen Generalisierungen des rot dargestellten Originalobjekts gezeigt. Man sieht, dass in Abhängigkeit von der Größe des generalisierten Polygons sich auch die Lage des Schwerpunktes ändert, auch wenn keine explizite räumliche Verschiebung stattgefunden hat.

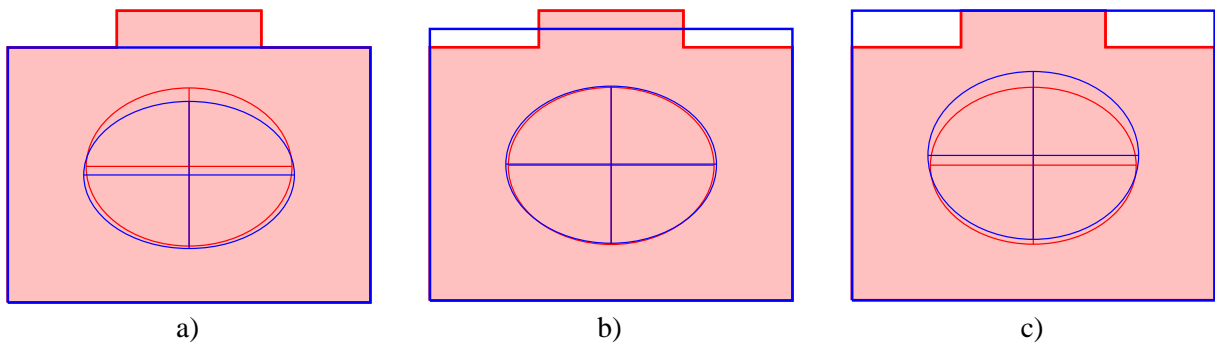


Abbildung 5.5: Drei alternativen Generalisierungen (blau) eines Objekts (rot)

Wie den drei Beispielen zu entnehmen ist, weist die Generalisierung in Abbildung 5.5 b) die beste Übereinstimmung zwischen den Approximationsellipsen des originalen und generalisierten Objekts auf. Daraus kann die bestmögliche Generalisierung eines Objekts in Abhängigkeit von der Größe des gelöschten Elements geschätzt werden (vgl. auch Abbildung 5.6).

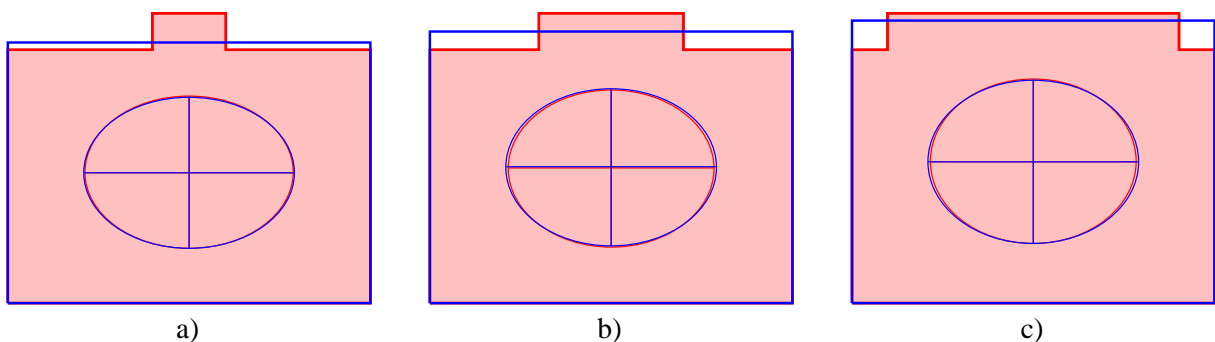


Abbildung 5.6: Bestmögliche Generalisierung in Anhängigkeit von der Größe des gelöschten Elements gemäß Approximationsellipsen

Auf diese Weise entspricht die beste Generalisierung der Objekte laut dem Vergleich der Approximationsellipsen einer vereinfachten Form mit ausgeglichenem Flächeninhalt. Dies gewährleistet die Erhaltung der Lage des Objektschwerpunktes und dessen Ausdehnung, obwohl die Achsenlänge sich etwas vom Original unterscheiden kann. Insbesondere ist es in Abbildung 5.6 b) und c) zu erkennen, wo die Hauptachsen der generalisierten Objekte etwas länger als die vom Original sind.

Bisher werden nur die Fälle betrachtet, wo die Veränderung des originalen Objekts symmetrisch zu dessen Achsen abläuft. Jedoch verändern sich die statistisch berechneten Charakteristiken in Abhängigkeit von der Lage desselben Elements in Bezug zu den Hauptachsen des Objekts. Dessen entsprechende Entwicklung wird am Beispiel der ersten Generalisierung von Abbildung 5.5 a) untersucht. Somit zeigt Abbildung 5.7 drei originale Grundrisse (rot), die über einen gleichgroßen Vorsprung an der oberen Kante verfügen. Dieser ist jedoch an verschiedenen Stellen platziert. Die drei Objekte werden dadurch simplifiziert, dass der Vorsprung komplett eliminiert wird. Als Folge sind die entstandenen drei Generalisierungen komplett identisch (blau). Wie man Abbildung 5.7 a) entnehmen kann, ist die Verschiebung zwischen den Schwerpunkten des originalen und generalisierten Objekts achsenparallel. Jedoch wird der Translationsbetrag des Schwerpunktes größer, je weiter sich das gelöschte Element von den Objektachsen befindet bzw. je unsymmetrischer die Veränderungen des originalen Objekts sind. Dabei variiert sowohl die Translationsrichtung des Schwerpunktes als auch der Verhältnisbetrag zwischen den Objektachsen und deren Orientierung. Dies wirft die Frage auf, ob die Grundrisse in Abbildung 5.7 b) und c) tatsächlich schlechter generalisiert sind als das erste Beispiel. Denn die resultierende Flächen-differenz, sowie die Konturüberlappung sind in allen drei Fällen gleich.

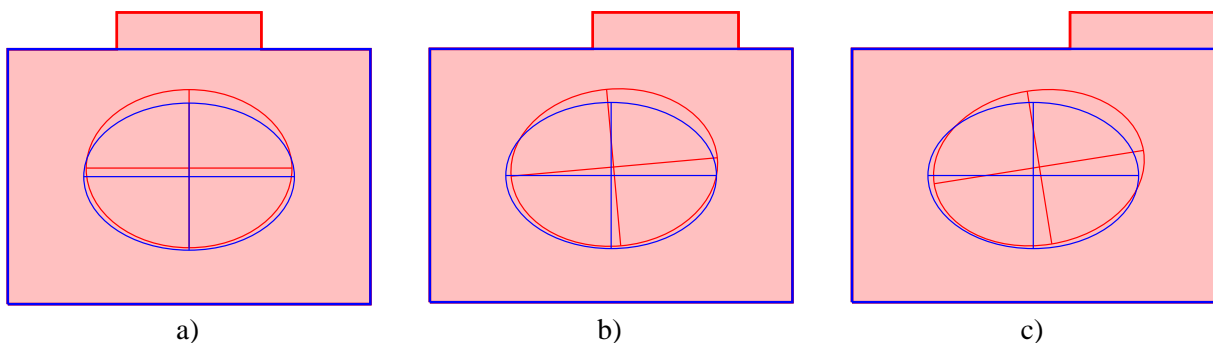


Abbildung 5.7: Translation des Schwerpunktes in Abhängigkeit von der Lage des gelöschten Elements relativ zu den Objektachsen

Darüber hinaus führt der Effekt zu dem umgekehrten Problem, wenn das originale und generalisierte Objekt unter dem Einfluss einer Translation verglichen werden sollen. Die übliche Vorgehensweise in dem Fall besteht darin, die Objekte gemäß der Lage ihrer Schwerpunkte zu überlagern (siehe Abbildung 5.8).

Diese Ergebnisse veranschaulichen, dass die auf diese Weise erhaltenen Überlappungen der Gebäudegrundrisse nicht optimal sind und für einen menschlichen Betrachter kaum nachvollziehbar sein können. Dementsprechend muss die Frage gestellt werden, nach welchen Charakteristiken die bestmögliche Überlappung von Objekten definiert sein muss und wie diese alternativ zu der Überlagerung der Objektschwerpunkte berechnet werden kann.

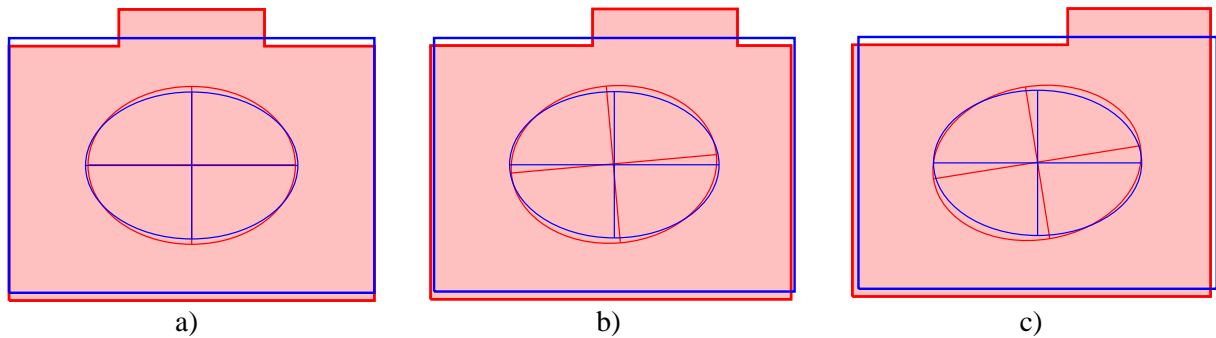


Abbildung 5.8: Überlagerung der Schwerpunkte zweier Objekte

Zusammenfassend kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass die Lage des Schwerpunktes, sowie die Orientierung des Objekts, die nach den zentralen Momenten berechnet werden, von der Größe des gelöschten Elements und dessen Lage relativ zu den Objekthauptachsen abhängig sind. Die daraus folgenden Konsequenzen können von zwei Seiten betrachtet werden. Einerseits kann bei dem Vergleich des originalen Objekts mit dessen Generalisierung anhand dieser Charakteristiken eine Verschiebung des Schwerpunkts aufgedeckt werden, die ausschließlich durch die Formveränderung bedingt sind und nichts mit der Translation des generalisierten Objekts zu tun hat. Andererseits führt die Kompensierung der Translation durch die Überlagerung der Schwerpunkte der Objekte nicht immer zur optimalen Überlappung des Objekts.

5.2.3. Orientierung

Obwohl der Fokus der Diskussion im vorherigen Abschnitt auf der Berechnung des Schwerpunkts eines Objekts liegt, wurde gleichzeitig auch die Frage der Schätzung der Objektorientierung etwas berührt. Das liegt daran, dass die geometrischen Merkmale eines Objekts oftmals eng miteinander verbunden sind. Auf diese Weise bedeutet die Konturveränderung eines Objekts gleichzeitig die Veränderung dessen räumlicher Erstreckung und umgekehrt. Insbesondere ist es bei der Berechnung der statistischen Charakteristiken merkbar, wobei die Lage des Objekts, dessen Orientierung und Ausdehnung im direkten Zusammenhang stehen. Die unten angeführte Diskussion widmet sich den Merkmalen für die Berechnung der Objektorientierung, die speziell in Bezug auf die Gebäudegrundrisse betrachtet wird.

Genau wie bei der Berechnung der Objektausdehnung, die im Anhang B.1.3 detailliert dargestellt wird, kann die Orientierung eines Objekts unterschiedlich definiert werden. Diese zwei Konzepte sind dadurch eng miteinander verbunden, da von der Wahl der Hauptachse eines Objekts sowohl dessen Länge als auch dessen Orientierung in Abhängigkeit stehen. Abbildung 5.9 lässt beurteilen, inwieweit sich die aufgrund von verschiedenen Charakteristiken berechneten Orientierungen eines Objekts unterscheiden können. Hier wird die Orientierung eines Grundrisses (siehe Abbildung 5.9 a)) mithilfe des minimal umschließendes Rechtecks (MURs) und der zentralen Momente, wie in Abbildung 5.9 b) und c) entsprechend, berechnet. Die Orientierung der Hauptachse α ist für die beiden Fälle ziemlich unterschiedlich, wobei sie für das MUR parallel zu den Objektseiten ist, während die zentralen Momente eher einen statistisch berechneten Durchschnitt zum Ausdruck bringen.

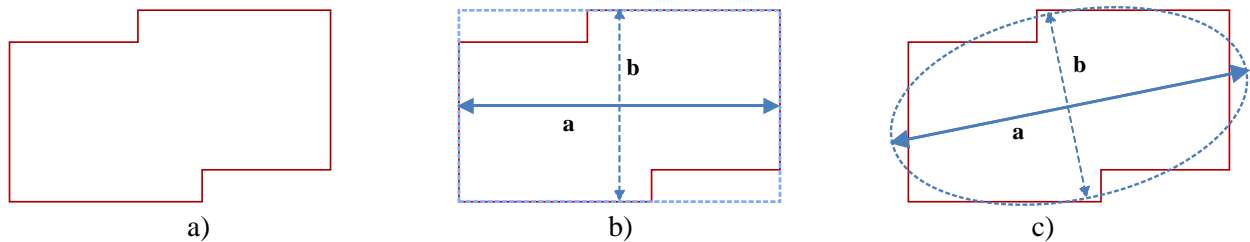


Abbildung 5.9: a) Gebäudegrundriss, b) Orientierung eines Gebäudegrundrisses aus dem umschließenden Rechteck und c) statistisch berechnete Orientierung

Bei der Evaluierung der Generalisierungsergebnisse ist es notwendig festzustellen, inwieweit die Geometrie eines Objekts verändert wird. In diesem Fall, ob die Orientierung eines Grundrisses gleich geblieben ist oder eine Rotation stattgefunden hat. Wie die Beispiele in Abbildung 5.7 zeigen, ist die Rotation der nach den zentralen Momenten berechneten Hauptachsen nach der Generalisierung ausschließlich formbedingt. Demzufolge kann man schließen, dass nicht alle Charakteristiken für den Vergleich der Orientierung eines originalen und generalisierten Objekts geeignet sind, da sie diesbezüglich nicht immer die für diese Objektklasse adäquaten Ergebnisse liefern.

Es hat sich herausgestellt, dass es nicht so einfach ist, das Konzept der Orientierung für einen Gebäudegrundriss zu definieren. Die in (Duchêne et al., 2003) vorgestellte Arbeit befasst sich tiefgreifend mit dieser Frage. Auf diese Weise kann die Orientierung eines Objekts auf den drei Detaillierungsebenen, die in Abschnitt 2.2.2 eingeführt werden, betrachtet werden, nämlich einzeln, relativ zu einem anderen Objekt oder innerhalb einer Gruppe. Dementsprechend können drei verschiedene Arten der Objektorientierung festgelegt werden, die alle bei der Generierung der Generalisierungsergebnisse und deren Evaluierung berücksichtigt werden müssen:

- Absolute Orientierung, die unmittelbar als die Richtung der maximalen Ausdehnung eines Objekts definiert wird
- Relative Orientierung, wobei die Ausrichtung eines Objekts in Bezug auf andere Objekte angepasst werden kann, wie z.B. eine Gebäudefassade entlang einer Straßenseite
- Musterorientierung bezieht sich auf die Orientierung der Objekte innerhalb einer Gruppe, die gemeinsam ein Muster bilden. Dies entspricht dem höheren Abstraktionskonzept, das durch die Gestaltprinzipien modelliert werden kann. Somit ist es für die korrekte Generalisierung wichtig, die vorhandenen räumliche Strukturen aufzudecken und wiederzugeben

Da der Fokus dieser Arbeit auf der Evaluierung einzelner Gebäudegrundrisse liegt, werden die letzten zwei Orientierungsarten nicht in Betracht gezogen. Dennoch kann das Konzept der Orientierung selbst für einen einzelnen Gebäudegrundriss nicht eindeutig formuliert werden. Beispielsweise werden in (Bard, 2004) zwei verschiedene Charakteristiken zu diesem Zweck eingesetzt, die allgemeine Orientierung eines Objekts und die Seitenorientierung, deren Beträge vor und nach der Generalisierung verglichen werden. Die allgemeine Orientierung wird in dieser Arbeit als der Durchschnitt zwischen den Orientierungen der zwei größten Diagonalen eines Objekts berechnet. Im Unterschied zur maximalen Sehne (siehe Abbildung B.2 a)) verbindet diese Linien die zwei am weitesten liegenden Eckpunkte einer Kontur.

Ein typisches Beispiel, wenn die allgemeine Orientierung eines Objekts und dessen Seitenorientierung unterschiedliche Ergebnisse liefern, ist ein treppenförmiger Grundriss, wie in Abbildung 5.10 a). Hier sind die Gebäudewände, deren Orientierung unten mit einem roten Kreuz gezeigt ist, anders als die gesamte Geometrie des Objekts ausgerichtet (blaue Linie). Die übliche Vorgehensweise für die Simplifizierung einer solchen Form besteht in der Eliminierung der Stufenzahl

(siehe Abbildung 5.10 b)), wobei sich die allgemeine Orientierung und Seitenorientierung weiterhin unterscheiden und mit den gleichen Charakteristiken des Originals übereinstimmen. Auf der hohen Abstraktionsebene jedoch kann so ein Grundriss durch ein Rechteck ersetzt werden, dessen Seiten parallel oder senkrecht zu der allgemeinen Orientierung des Objekts ausgerichtet sind (vgl. Abbildung 5.10 c)). Dies ist ein Beispiel dafür, dass der Unterschied zwischen den Orientierungsbeträgen eines Objekts vor und nach der Generalisierung nicht unbedingt für schlechte Ergebnisse spricht.

Die weiteren vielfältigen Methoden zur Berechnung der allgemeinen Orientierung eines Objekts und insbesondere deren Eignung für die Charakterisierung der Gebäudegrundrisse wird sehr ausführlich in (Duchêne et al., 2003) untersucht. Demzufolge kann die Orientierung eines Objekts als *die Orientierung dessen längsten Kante* definiert werden. Alternativ kann *der gewichtete Bisektor* verwendet werden, der aus den zwei größten Diagonalen des Objekts, wie in der oben beschriebenen Arbeit, berechnet und in dem Fall als Durchmesser bezeichnet wird. Dabei wird anstatt des einfachen Durchschnitts der Beitrag jeder Richtung in das Endergebnis aufgrund der Länge des entsprechenden Durchmessers geschätzt. Das minimal umschließende Rechteck stellt noch eine Möglichkeit dar, die allgemeine Orientierung eines Objekts zu messen. Die Orientierung der Objektseiten kann als *die Mittel aller Orientierungen der Objektkanten* (engl. „wall average“) berechnet werden, gewichtet durch deren entsprechende Länge. Die *statistische Gewichtung* (engl. „statistical weighting“) ist ein anderes Verfahren, das zu diesem Zweck verwendet werden kann. Dabei werden die Orientierungen α_i von 0 bis π mit einem vorgegebenen Schritt generiert. Für diese Richtung werden die Objektkanten mit ähnlicher Orientierung gesucht, deren Orientierung in der Umgebung dieser Richtung $[\alpha_i - \delta, \alpha_i + \delta]$ liegt. Somit resultiert das Gewicht jeder generierten Richtung als die Längensumme aller Kanten, die in der Umgebung dieser Richtung liegen. Im Rahmen dieser Arbeit wird der gewichtete Durchschnitt weiter modifiziert. Dabei wird die Orientierungsspanne von 0 bis $\pi/2$ betrachtet. In dem Fall werden zum Gewicht einer Richtung nicht nur die Objektkanten beitragen, die unmittelbar in deren Umgebung liegen, sondern auch diejenigen, welche sich in der gleichen Umgebung der senkrechten Richtung befinden. Diese Charakteristik hat die Bezeichnung *statistische Seitengewichtung* (engl. „wall statistical weighting“) bekommen und liefert bei den rechtwinkligen Gebäudegrundrissen die gleichen Ergebnisse wie die statistische Gewichtung.

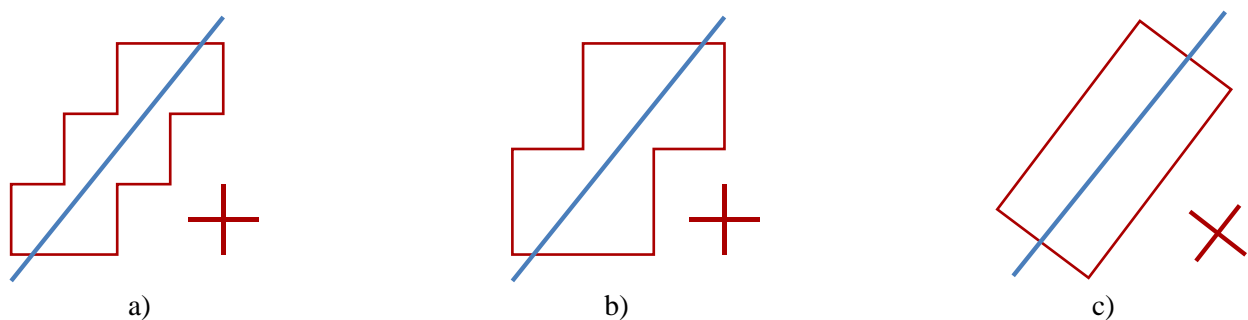


Abbildung 5.10: Allgemeine Orientierung eines Grundrisses (blaue Linie) und Seitenorientierung (rotes Kreuz)

Für die Objekte mit komplexerer Form können mehr als eine Orientierungsrichtung existieren, wie Abbildung 5.11 veranschaulicht. Hier sind für jeden Gebäudegrundriss die Hauptorientierungen dessen Seiten mit einem blauen Kreuz gezeigt, wobei unten sowohl die Hauptorientierung, als auch die zweite Richtung mit weniger Wichtigkeit (gestrichelte Linie) Modulo $\pi/2$ dargestellt sind.

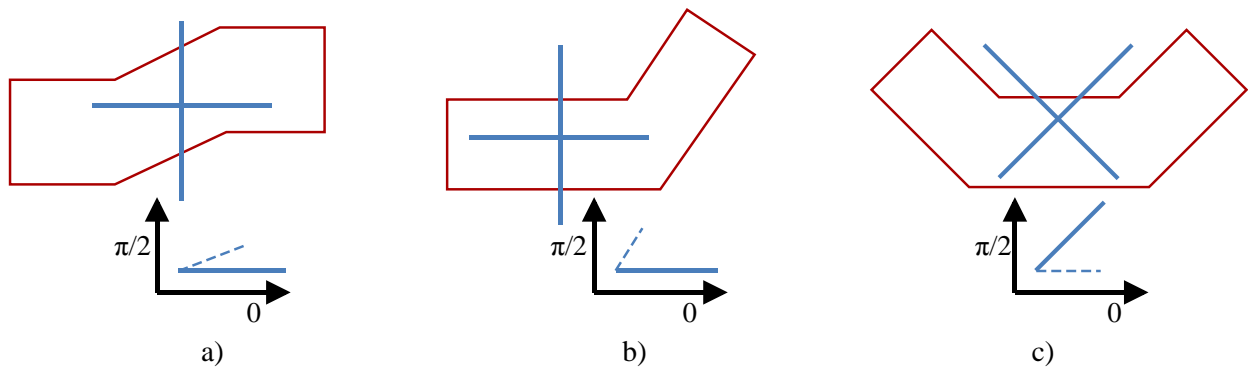


Abbildung 5.11: Gebäudegrundrisse mit mehrere Seitenorientierungen nach (Duchêne et al., 2003)

Letztendlich wird die Berechnung der Orientierung für die Objekte diskutiert, deren Form ein typisches Muster darstellt. Dabei handelt es sich um die Musterklassen, die der Form der folgenden Buchstaben des Alphabets zugeordnet werden können: U, L, H, T und S/Z. Einige Beispiele werden in Abbildung 5.12 gezeigt, wobei die Orientierung eines Musters mit einem blauen Pfeil markiert ist.

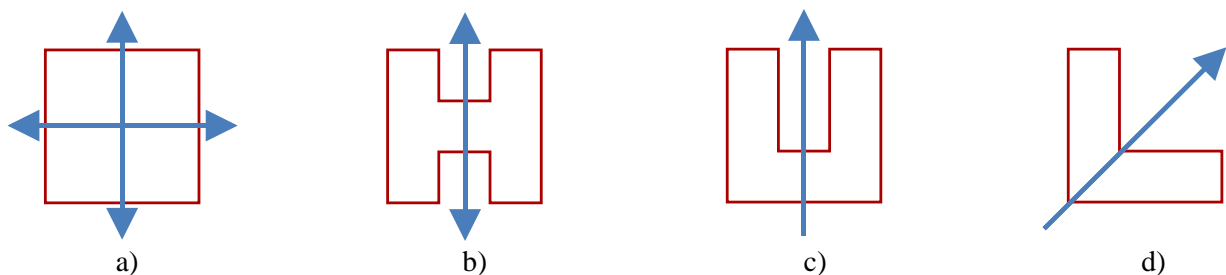


Abbildung 5.12: Formorientierung eines Musters nach (Duchêne et al., 2003)

Zusammengefasst kann die Orientierung eines einzelnen Gebäudegrundrisses anhand von drei Merkmalen charakterisiert werden:

1. Allgemeine Orientierung (engl. „general orientation“) wird durch den Modulo π bzw. durch die Richtung der maximalen Ausdehnung definiert und kann aus diesem Grund für die Objekte mit dem hohem Kreisförmigkeitsgrad (siehe Anhang B.1.1), wie z.B. Quadrat, nicht berechnet werden. Die beste Charakteristik ist die Ausdehnung des minimalen umschließenden Rechtecks.
2. Seitenorientierung (engl. „wall orientation“) wird durch Modulo $\pi/2$ bzw. durch die zwei orthogonalen Richtungen vorgegeben. Dabei können für einen nicht rechtwinkligen Gebäudegrundriss auch andere lokale Orientierungen existieren. Die beste Charakteristik ist die statistische Seitengewichtung.
3. Formorientierung (engl. „shape orientation“) ist für jeden Mustertyp festgelegt und kann dementsprechend Modulo $\pi/2$ (für ein Quadrat), π (für H) oder 2π (für L und U) sein (siehe Abbildung 5.12).

6 Konturbezogene Charakteristiken

Die Erhaltung von Fassadenlinien ist ein wichtiger Aspekt für die Gewährleistung der Konsistenz zwischen den verschiedenen Detaillierungsniveaus von Geoinformationen. Besonders wenn auch die Nachbarschaft eines Objekts betrachtet wird, so ist ein generalisierter Grundriss vorzuziehen, der möglichst genau innerhalb seiner originalen Grenzen verbleibt. Denn durch die Konturänderung können topologische Konflikte entstehen, wie z.B. unerwünschte Überlappungen mit benachbarten Objekten. In diesem Fall soll die Ähnlichkeit von originalen und generalisierten Polygonen nur aufgrund des Vergleichs ihrer Umrisse geschätzt werden.

In Bezug auf die Generalisierung kann diese Eigenschaft des Generalisierungsergebnisses als Grundrisstreue bezeichnet werden. Basierend auf den standardisierten Grundlagen der Objektmodellierung (siehe Abschnitt 4.2.1) wird die Kontur eines Objekts mengentheoretisch durch den Rand seiner Punktmenge repräsentiert. Dies ermöglicht es, Objekte als Punktfolgen zu vergleichen und ist damit nicht auf die Zuordnung von Strukturelementen angewiesen.

Auf diese Weise gibt die Charakteristik der Grundrisstreue an, wie genau der Konturverlauf eines originalen Objekts nach der Generalisierung wiedergegeben wird. Diese kann zum einen aufgrund der maximalen Abweichung zwischen den zwei Konturen berechnet werden, was im Abschnitt 6.1 thematisiert wird. Der nach der Generalisierung ohne Änderung an der Kontur verbliebene Anteil stellt ein für die Qualitätsbewertung weiteres interessantes Merkmal dar. (siehe Abschnitt 6.2). Hier ist zu beachten, dass infolge der Generalisierung die Umfangslänge eines Grundrisses durch die Vereinfachung meistens kürzer wird. Dabei spielt das Verhalten einer Kenngröße bei der Entwicklung der Qualitätscharakteristiken eine wichtige Rolle. Die Besonderheiten der Ähnlichkeitsbestimmung zweier Konturen speziell für die Gebäudegrundrisse werden im Folgenden ausführlich diskutiert.

6.1. Maximale Distanz zwischen zwei Konturen

Ähnlich wie die graphische Mindestgröße bei Papierkartenwerken wird der Generalisierungsvorgang von Digitaldaten durch die sogenannte Minimaldistanz initiiert. Diese Kenngröße charakterisiert den Detaillierungsgrad eines Objekts und kann zum Zweck der Visualisierung in Beziehung zum metrischen Maßstab gesetzt werden (siehe Abschnitt 2.2), wobei sie als Sichtbarkeitschwellwert dient.

Markant für die Minimaldistanz der Generalisierung ist, dass die Kenngröße nicht einheitlich in der Literatur bezeichnet wird. In (Staufenbiel, 1973) wird sie z.B. „Kleinseite“ genannt, während in (Sester, 2000b) die Bezeichnung „minimale Länge“ eingeführt wird (siehe Abbildung 6.1 a)). Auch in der Bedeutung weisen diese Begriffe Unterschiede auf. So wird bei der Simplifizierung von Kada (Kada and McKinley, 2009) nicht nur die kleinste sichtbare Kantenlänge berücksichtigt, sondern auch der kleinste Abstand zwischen zwei parallelen Polygonseiten. Eine solche Situation kommt bspw. vor, wenn zwei Gebäudeteile durch ein schmales Bauelement verbunden sind, wobei der Grundriss an sich keine kurze Kante aufweist (vgl. Abbildung 6.1 b)).

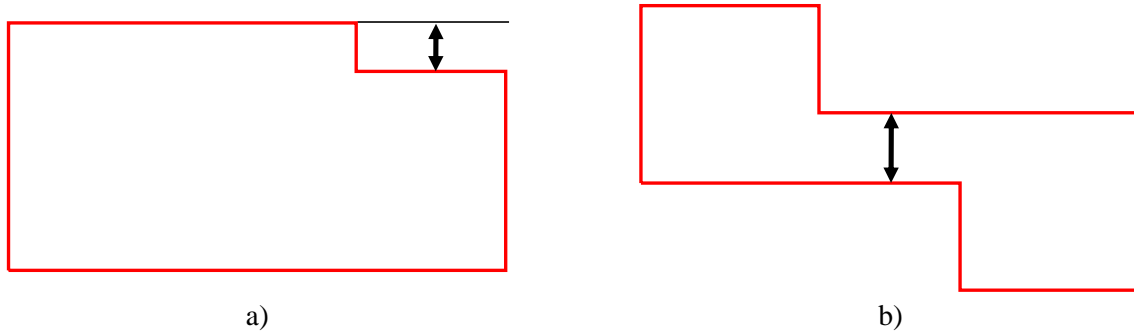


Abbildung 6.1: Minimaldistanz der Generalisierung als a) minimale Länge und b) kleinster Abstand zwischen zwei parallelen Polygonseiten

Zusammenfassend ergeben sich durch die Größe der Minimaldistanz zwei Rahmenbedingungen, die bei der Generalisierung berücksichtigt werden sollen und miteinander in Beziehung stehen. Einerseits soll der Grundriss nach der Generalisierung keine Elemente enthalten, die kleiner als die Minimaldistanz sind, was eine Formveränderung zur Folge haben kann. Andererseits soll der Veränderungsgrad des Grundrisses nicht größer als notwendig sein. Im schlechtesten Fall wird dies eine Veränderung wiederum um einen Wert nahe der Minimaldistanz sein.

Daraus folgend sollen die Unterschiede zwischen dem originalen und generalisierten Objekt den Wert der Minimaldistanz nicht überschreiten. Zur Berechnung der tatsächlichen Abweichung zweier Grundrisse ist die Hausdorff-Distanz (siehe Anhang B.3.1) sehr gut geeignet, da diese Kenngröße den Maximalabstand zwischen den Objekten charakterisiert und keine Kenntnisse über den Generalisierungsalgorithmus benötigt. Somit kann aufgrund des Vergleichs der Hausdorff-Distanz mit der Minimaldistanz die allgemeine Korrektheit des durchgeführten Generalisierungsvorganges beurteilt werden.

Für Hausdorff-Distanzwerte größer als die Minimaldistanz können zwei verschiedene Situationen in Betracht kommen. Eine deutlich den Generalisierungsschwellwert überschreitende Hausdorff-Distanz kann als Indikator für die Erkennung von fehlenden Objektteilen dienen. Dies ist typischerweise der Fall, wenn ein bedeutendes Element des Grundrisses trotz seiner wesentlichen Länge vollständig gelöscht wird, da die Breite kürzer als die Minimaldistanz ist. Unter den fehlenden Objektteilen werden nicht nur Vorsprünge, sondern auch Einsprünge gemeint, wie es in Abbildung 6.2 gezeigt ist. Dabei wird das generalisierte Objekt durch eine ziemlich große Veränderung der Gesamtfläche im Vergleich zum originalen Polygon charakterisiert. Die durch die Simplifizierung der Vor- und Einsprünge entstehenden Fehl- und Mehrflächen werden entsprechend als Intrusionen und Extrusionen bezeichnet (siehe Abschnitt 7.1). In dem Fall können die Bewertungsergebnisse nur durch eine topologische Änderung des generalisierten Modells verbessert werden, wobei der fehlende Teil erhalten bleiben muss. Somit ist ein hoher Wert der Hausdorff-Distanz als ein Anzeichen dafür zu betrachten, dass für solche Grundrisselemente eher der Betonungsoperator verwendet sein sollte, anstatt sie zu entfernen.

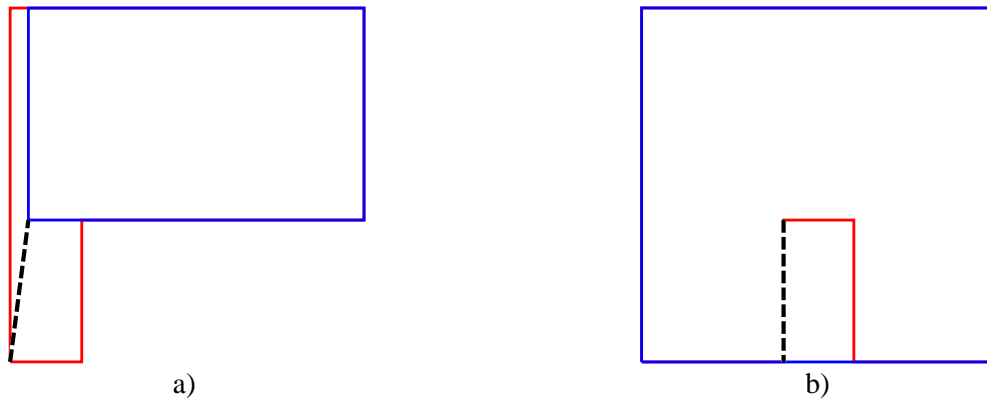


Abbildung 6.2: Hausdorff-Distanz zwischen dem originalen (rot) und generalisierten (blau) Grundriss durch Eliminierung eines a) Vorsprungs und b) Einsprungs

Anders kann der zweite Fall interpretiert werden, wobei die Hausdorff-Distanz nur geringfügig über die Minimaldistanz hinausgeht. Eine solche Situation kommt überwiegend dann vor, wenn ein Zug von Kanten, die eine oder mehreren Ausbuchtungen in der Objektkontur bilden, durch eine einzelne Kante ersetzt wurde. Dabei lassen sich die Flächenunterschiede ziemlich gut beseitigen, indem für die generalisierte Kante eine mittlere Lage bezüglich des Verlaufs des originalen Umrisses ausgewählt wird. In diesem Fall reicht eine Verschiebung der modifizierten Kante aus, um die Hausdorff-Distanz zu verkleinern, was ohne Änderung der topologischen Struktur des Objekts erfolgen kann. Abbildung 6.3 a) zeigt, dass der Unterschied zwischen der originalen und generalisierten Kontur reduziert werden kann, wenn die Polygonseite, die zwei Versprünge ersetzt, unwesentlich nach unten bewegt würde.

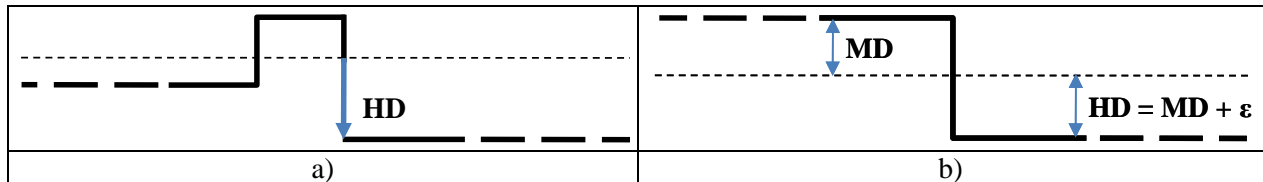


Abbildung 6.3: Hausdorff-Distanz bei a) Verschiebung einer generalisierten Polygonseite und b) unkorrekter Generalisierung eines Seitenversprungs

Dennoch kann allein durch das Betrachten der Hausdorff-Distanz nicht immer erkannt werden, ob die Generalisierung nur durch die Verschiebung von Kanten des generalisierten Modells verbessert werden kann. Abbildung 6.3 b) zeigt die Simplifizierung eines Seitenversprungs, der durch die gestrichelt dargestellte Kante ersetzt wurde. In diesem Fall ergibt sich die Hausdorff-Distanz als der Abstand zwischen der generalisierten Linie und der unteren Kante der originalen Kontur. Sie übersteigt die Minimaldistanz um einen gewissen Betrag ϵ , der beliebig klein sein kann. Der Versuch, diesen Wert durch die Verschiebung der simplifizierten Kante nach unten zu reduzieren, wird lediglich dazu führen, dass sich die Distanz zwischen der generalisierten Seite und der oberen Kante der originalen Kontur vergrößert. Die Hausdorff-Distanz wird aber größer als die Minimaldistanz bleiben. Die Simplifizierung eines Vorsprungs, dessen Ergebnis eine zweimal größere Hausdorff-Distanz als die Minimaldistanz hat, weist auf einen offensichtlichen Fehler der Generalisierung hin.

Zusammenfassend können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Die Hausdorff-Distanz kann als primäres Kontrollwerkzeug zur Bewertung der Korrektheit von Generalisierungsergebnissen verwendet werden.

- Der aufgrund der Hausdorff-Distanz berechnete Wert der Maximalabweichung zwischen zwei Grundrissen lässt sich mit dem Soll-Wert der Minimaldistanz der Generalisierung vergleichen und sollte ihn nicht überschreiten.
- Allerdings garantiert eine geringe Hausdorff-Distanz nicht, dass der generalisierte Grundriss topologisch richtig ist.
- In einigen Fällen, wenn die Hausdorff-Distanz unwesentlich größer als die Minimaldistanz ist, können die Ergebnisse manchmal durch die Verschiebung existierender Kanten verbessert werden.

6.1.1. Unzulänglichkeiten der originalen Hausdorff-Distanz (Probleme bei der Berechnung der Maximaldistanz)

In der Praxis wird die Berechnung der Hausdorff-Distanz durch Approximation vereinfacht, bei der die kürzesten Distanzen ausschließlich von den Knoten des einen Objekts zu den Kanten des anderen Objekts und umgekehrt berechnet werden. In der Tat befindet sich der Maximalabstand zwischen zwei Grundrissen oftmals an einem der Knoten der beiden Objekte, wenn deren lineare Segmente einen annähernd ähnlichen Verlauf aufweisen. In diesem Fall entspricht die Vertex-Hausdorff-Distanz der ursprünglichen Charakteristik, so dass die genaueren Berechnungen überflüssig sind.

Jedoch scheitert dieser Ansatz, wenn die geometrische Form der zu vergleichenden Objekte stark unterschiedlich ist. Dabei können die Endknoten eines Segments des Referenzobjekts näher zur Kontur des anderen Objekts liegen als die Punkte innerhalb dieses Segments. Wie in (Hangouët, J.-F., 1995) detailliert erläutert, existiert in dem Fall auf dem Segment so ein Punkt, wo im selben Abstand mehrere Punkte des zweiten Objekts gefunden werden können.

Abbildung 6.4 illustriert einen typischen Fall, wo die beschriebene Situation auftreten kann. Der originale Grundriss stellt einen offenen Ring dar, dessen rechter Teil nach der Generalisierung eliminiert wurde und als Folge davon ein U-förmiger Grundriss entstanden ist. Kennzeichnend für diese Formumwandlung ist, dass die Abstände von den Punkten, die den gelöschten Vorsprung bilden, zur zweiten Kontur an den Endknoten der Segmente am kürzesten sind. Die größte Distanz an der Stelle ist in Abbildung 6.4 a) mit der fein gestrichelten Linie markiert. Im Gegensatz dazu steigen die Distanzen bei der Bewegung von den Endknoten hin zur Mitte der vertikalen Segmente des Vorsprungs. Der von der generalisierten Kontur tatsächlich maximal entfernte Punkt, der unter Berücksichtigung aller konturbildenden Punkte identifiziert werden muss, liegt innerhalb der längsten Seite des eliminierten Vorsprungs. Dementsprechend sind zwei gleichwertige Abstände vorhanden, die von diesem Punkt ausgehen (vgl. Abbildung 6.4 b)).

Die Berechnung der Maximaldistanz dient hauptsächlich dem Zweck, die durch die Generalisierung entstandenen Problemstellen zu identifizieren. Wie man in Abbildung 6.4 sieht, weist die breit gestrichelt dargestellte Vertex-Hausdorff-Distanz nicht nur den falschen quantitativ unterschätzten Betrag auf, sondern lässt auch die richtige Stelle für die Maximaldistanz zwischen den Objekten nicht erkennen. Die beschriebenen Nachteile tragen dazu bei, solch eine Berechnungsmethode für die Maximaldistanz zwischen zwei Grundrissen zu entwickeln, die sowohl die Einfachheit der Vertex-Hausdorff-Distanz als auch die Korrektheit der Ergebnisse in sich vereinigt.

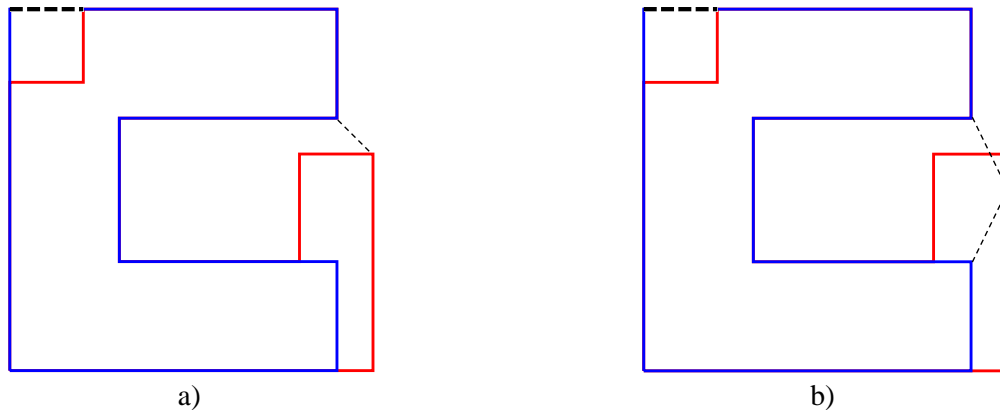


Abbildung 6.4: a) Algorithmisch bestimmte und b) erwartete Hausdorff-Distanz

Eine weitere Frage, die bei der Berechnung des Maximalabstandes beantwortet werden muss, ist, inwieweit die Lösungen unter Verwendung der Hausdorff-Distanz intuitiv sind. Grundsätzlich werden die Punkte beider Grundrissen laut der Definition der Hausdorff-Distanz aufgrund der minimalen Abstände zugeordnet, was nicht immer der menschlichen Wahrnehmung entspricht.

Wie man Abbildung 6.5 a) entnehmen kann, verläuft die Maximaldistanz zwischen den Objekten von der rechten oberen Ecke des generalisierten Vorsprunges zu der am nächsten liegenden Kante vom generalisierten Grundriss, dargestellt als breit gestrichelte Linie. Ein menschlicher Betrachter wird höchst wahrscheinlich die Maximaldistanz an der Stelle empfinden, die durch die fein gestrichelte Linie markiert ist, da der gelöschte Vorsprung sich vielmehr auf den unteren Teil des generalisierten Grundrisses bezieht. Ein ähnliches Beispiel ist in Abbildung 6.5 b) zu sehen. Hier befindet sich die Maximaldistanz zwischen dem obersten Knoten des gelöschten Einsprungs und der linken Seite des generalisierten Grundrisses, obwohl dieses Element ein Bestandteil der unteren Seite der originalen Kontur war.

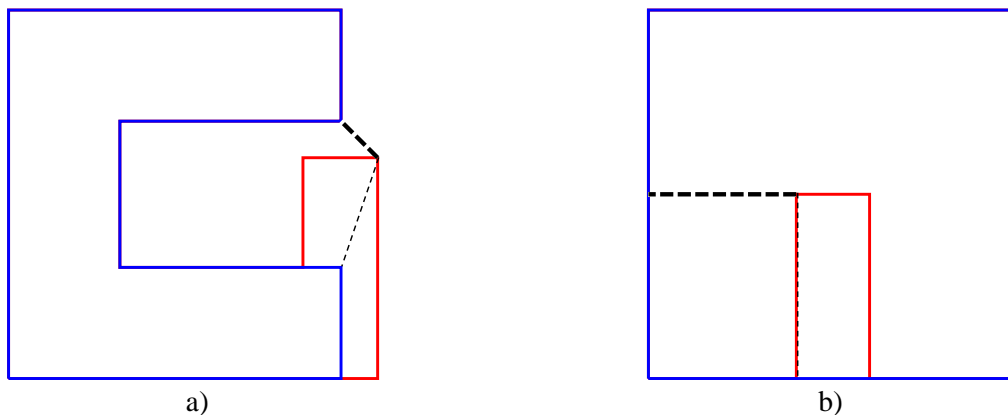


Abbildung 6.5: a) Identifizierung des Maximalabstandes zwischen zwei Konturen aufgrund der Hausdorff-Distanz und b) aus der Sicht der Wahrnehmung (dünn und dick gestrichelt)

Abbildung 6.5 veranschaulicht, dass die Hausdorff-Distanz als eine Charakteristik für die Berechnung der Maximaldistanz zwischen zwei Grundrissen nicht immer angemessene Ergebnisse liefert. Um diesen Nachteil zu beseitigen, kann es sinnvoll sein, die Übereinstimmungen zwischen den beiden Objekten nicht aufgrund der kürzesten Distanzen zwischen deren einzelnen Punkten festzustellen, sondern die eliminierten Elemente als Ganzes in Betracht zu ziehen. Jedenfalls benötigt das Thema eine weitere Untersuchung und wird im nächsten Abschnitt ausführlich diskutiert.

6.1.2. Modifizierte Hausdorff-Distanz

Die fehlerhafte Elementzuordnung zwischen dem originalen und generalisierten Grundriss kann dadurch vermieden werden, dass die Hausdorff-Distanz nicht aufgrund aller Stützpunkte beider Grundrisse berechnet, sondern innerhalb jedes einzelnen gelöschten Elements i gesucht wird (vgl. Abbildung 6.6). Dafür muss zuerst identifiziert werden, welche Segmente zu dem originalen oder generalisierten Grundriss gehören. Hierbei sind die Grundrisse entsprechend als die Punktmengen (O) und (G) bezeichnet. Danach kann die Hausdorff-Distanz zwischen diesen Segmenten (HD_i) bestimmt werden. Der maximale Abstand zwischen zwei Grundrissen (HD_{Mod}) ist der Maximalwert aus all den auf diese Weise berechneten Hausdorff-Distanzen, die gemeinsam die Menge (HD) bilden.

Wie oben erklärt, sind unter den gelöschten Elementen sowohl die reduzierten als auch die nach der Generalisierung neu entstandenen Teile des originalen Grundrisses gemeint. Grundsätzlich wird bei diesem Ansatz davon ausgegangen, dass lediglich die Schnittpunkte beider Grundrisse eine direkte Übereinstimmung zwischen diesen Objekten aufweisen. Daraus folgend werden die Abweichungen zwischen den Abschnitten beider Konturen gemessen, die zwischen zwei gleichen Schnittpunkten der Grundrisse liegen. Der Ablauf dieses Verfahrens besteht aus folgenden Schritten:

1. Durch die Verschneidung des originalen und generalisierten Grundrisses werden die nach der Generalisierung gelöschten Teile, die sogenannten Intrusionen und Extrusionen, wie in Abbildung 6.6 a) und b) gezeigt, identifiziert. Zusammen stellen sie laut der Definition der Mengenlehre die symmetrische Differenz (SD) dar (siehe Abschnitt 7.1).

$$SD = (O \setminus G) \cup (G \setminus O) \quad (6.1)$$

2. Die Kontur jedes einzelnen gelöschten Teils wird zuerst mit der originalen und danach mit der generalisierten Kontur verschnitten, um die originalen und generalisierten Bestandteile (∂O_i) und (∂G_i) zu erkennen. Diese Segmentzüge sind entsprechend mit rot und blau in Abbildung 6.6 c) und d) gezeigt.

$$\partial O_i = \partial SD_i \cap O \quad (6.2)$$

$$\partial G_i = \partial SD_i \cap G \quad (6.3)$$

3. Die beiden einseitigen Hausdorff-Distanzen zwischen den originalen und generalisierten Bestandteilen werden sowohl in der einen Richtung $hd_i(O)$, als auch in der umgekehrter Richtung $hd_i(G)$ aufgrund der Vertex-Hausdorff-Distanz berechnet, wobei die kürzesten Distanzen von den Stützpunkten eines Segmentzugs zu den Linien und Punkten des anderen Segmentzug berechnet werden.

$$hd_i(O) = d(\partial O_i, \partial G_i) = d((\partial SD_i \cap O), (\partial SD_i \cap G)) \quad (6.4)$$

$$hd_i(G) = d(\partial G_i, \partial O_i) = d((\partial SD_i \cap G), (\partial SD_i \cap O)) \quad (6.5)$$

4. Der Maximalabstand innerhalb eines gelöschten Elements des Grundrisses ist das Maximum aus den beiden einseitig berechneten Hausdorff-Distanzen, wie Abbildung 6.6 e) darstellt.

$$HD_i = \max (hd_i(O), hd_i(G)) \quad (6.6)$$

5. Das Maximum aller Hausdorff-Distanzen, die für jeden gelöschten Teil berechnet werden, stellt die modifizierte Hausdorff-Distanz zwischen dem originalen und generalisierten Grundriss dar.

$$HD_{Mod} = \max (HD) \quad (6.7)$$

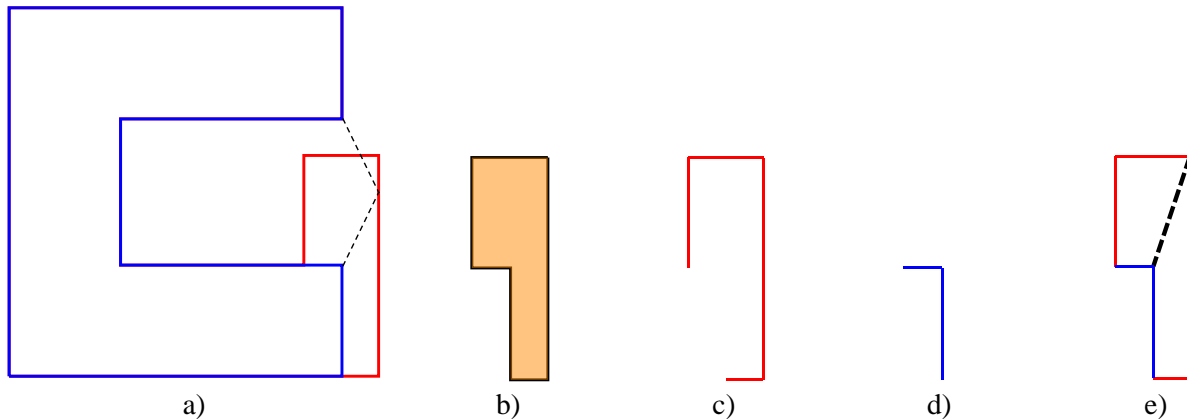


Abbildung 6.6: Die Berechnung der modifizierten Hausdorff-Distanz

Wie man Abbildung 6.6 entnehmen kann, liefert die beschriebene Vorgehensweise das erwartete Ergebnis. Ein wichtiger Vorteil des Verfahrens besteht darin, dass die gewünschte Zuordnung der Segmente des originalen und generalisierten Grundrisses ohne zusätzliche Analyse durchgeführt werden kann. Es ist jedoch eine weitere Untersuchung erforderlich, um festzustellen, in welchen Fällen noch und inwieweit die modifizierte Hausdorff-Distanz Unterschiede gegenüber der Hausdorff-Distanz aufweist und welche Auswirkung diese Unterschiede für die Qualitätsberechnung der Generalisierung haben können. Dieser Thematik widmet sich der nächste Abschnitt.

6.1.3. Originale vs. modifizierte Hausdorff-Distanz

Die in Abbildung 6.5 angeführten Beispiele veranschaulichen, dass die Diskrepanz zwischen der Hausdorff-Distanz und der modifizierter Hausdorff-Distanz grundlegend durch die unterschiedliche Zuordnung der Elemente des originalen und generalisierten Grundrisses bedingt sein kann. Dennoch kann der Unterschied zwischen den beiden Charakteristiken, selbst wenn bei deren Berechnung die Elemente gleich zugeordnet sind, auch daran liegen, dass die Bedingungen der Kollinearität und Rechtwinkligkeit eines oder beider Grundrisse nicht eingehalten werden. Dies betrifft hauptsächlich die originalen Grundrisse und kann sowohl durch die eigentliche geometrische Form dieser Objekte (siehe Abbildung 6.7) als auch durch die Ungenauigkeiten in deren Modellierung (vgl. Abbildung 6.8) verursacht werden.

In Abhängigkeit von der Konfiguration des gelöschten Elements können zwei Situationen auftreten. Falls die Hausdorff-Distanz bildenden Punkte auf der Kontur des gelöschten Elements liegen, liefern die beiden Charakteristiken die gleichen Ergebnisse, wie Abbildung 6.8 a) darstellt. Anderenfalls wird wie in Abbildung 6.8 b) der Betrag der Hausdorff-Distanz immer kleiner sein, da bei der Berechnung der modifizierter Hausdorff-Distanz der Lotfußpunkt, auf dem sich die möglichst kürzeste Distanz zu dem generalisierten Segment beruht, nicht mehr zu Verfügung steht (vgl. Abbildung 6.8 c)).

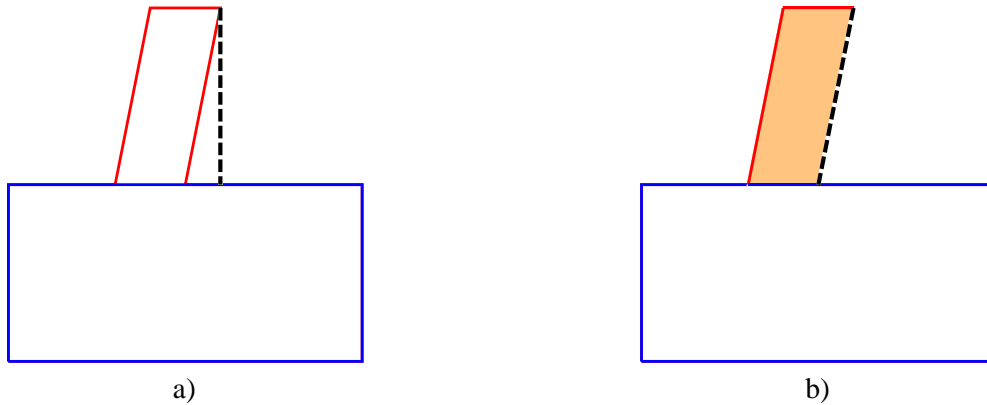


Abbildung 6.7: a) Hausdorff-Distanz und b) modifizierte Hausdorff-Distanz für einen gelöschten Vorsprung

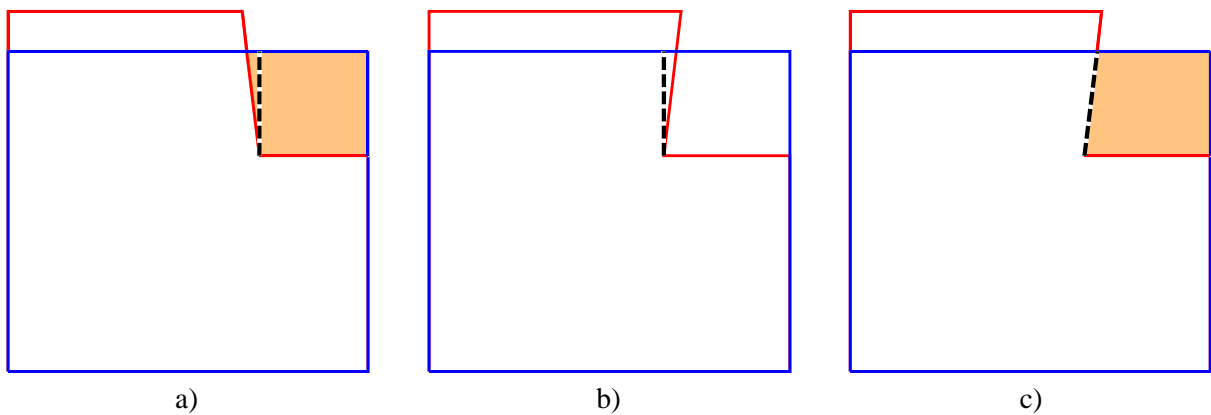


Abbildung 6.8: a) Beispielgrundriss, in dem die modifizierte Hausdorff-Distanz der originalen Hausdorff-Distanz entspricht. b) + c) Beispielgrundriss, in dem die b) Hausdorff-Distanz nicht der c) modifizierten Hausdorff-Distanz gleicht

Jedoch wird bei Gleichheit von Hausdorff-Distanz und modifizierten Hausdorff-Distanz nicht garantiert, dass der Maximalabstand an sich komplett innerhalb des eliminierten Elements verläuft. Dieser Fall kommt typischerweise dann vor, wenn der generalisierte Grundriss zur originalen Kontur angepasst wird. Abhängig von der Position der generalisierten Linie können gelöschte Elemente mit konkaver Form entstehen. Dabei verbindet zwar der Maximalabstand die zwei Punkte, die zur Kontur eines solches Elements gehören, liegt aber, wie in Abbildung 6.9 zu sehen ist, teilweise außerhalb des Elements.

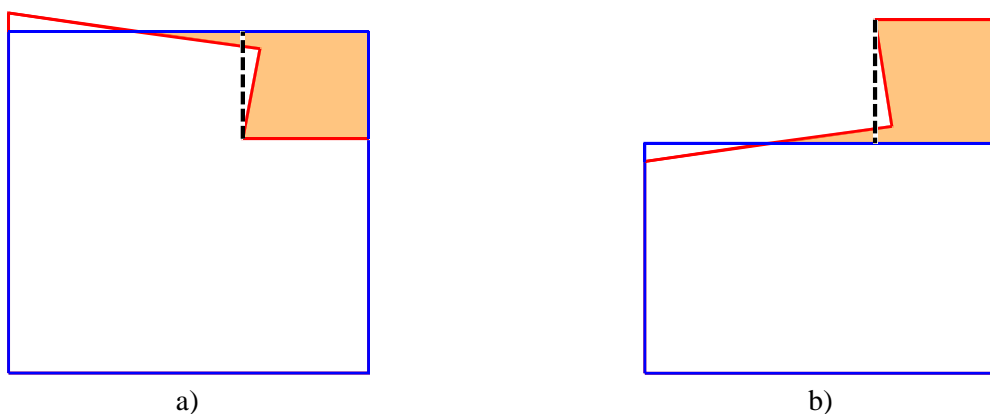


Abbildung 6.9: Gleichheit der Hausdorff-Distanz und der modifizierten Hausdorff-Distanz aufgrund geometrischer Ungenauigkeiten

Diese Beispiele veranschaulichen, dass neben dem Maximalabstand zwischen den originalen und generalisierten Segmentzügen eines gelöschten Elements auch dessen Form in Betracht kommen kann. Die Rolle dieser Charakteristik für die Qualitätsbewertung und die Methode zur deren Berechnung sind im Folgenden diskutiert.

6.1.4. Maximaler Abstand unter Beachtung konkaver Elemente

Die modifizierte Hausdorff-Distanz stellt wie die ursprüngliche Metrik eine gerade Strecke zwischen den zwei algorithmisch berechneten Punkten dar. Unter der Einhaltung der Bedingung, dass die Verbindungslinie innerhalb eines gelöschten Elements verlaufen soll, können jedoch diese maximal entfernten Punkte nicht immer mit einem einzelnen Liniensegment, sondern mit einem Linienzug verbunden werden. Der Unterschied zwischen der direkten Distanz und dem innenliegenden Linienzug kann als Formkomplexität des gelöschten Objektteils interpretiert werden. Die Berechnung dieses Linienzuges kann auf das Problem der Suche nach dem kürzesten Weg zwischen den zwei gegebenen Knoten in einem gewichteten Graph zurückgeführt werden. Dabei wird die Summe der Gewichte aller Kanten, die diesen Weg bilden, minimiert (Sedgewick, 1988). Der kürzeste Weg seinerseits stellt eine abwechselnde Sequenz von Knoten und Kannten dar, die sich niemals wiederholen dürfen (Gould, 1988).

Der Graph wird aufgrund des entsprechenden Polygons der symmetrischen Differenz SD_i mit n Punkten und Seiten generiert, in dem die betrachtete modifizierte Hausdorff-Distanz liegt. Sei $G = (p, q)$ ein gewichteter Graph, wobei die Ordnung (Anzahl der Knoten) $p = n$ oder $p = n + 1$, falls die modifizierte Hausdorff-Distanz aus einem Lotfußpunkt zu einer Polygonseite besteht, ist. Als erstes werden alle möglichen Verbindungen zwischen den Knoten des Graphen generiert, wie Abbildung 6.10 a) darstellt. Im nächsten Schritt werden die nicht vollständig innerhalb des gelöschten Elements liegenden Strecken aussortiert (Abbildung 6.10 b)). Die restlichen Strecken, einschließlich derer die auf der Kontur des gelöschten Elements liegen, werden als Kanten des Graphen betrachtet. Die Gewichte w ergeben sich aus den euklidischen Distanzen zwischen den entsprechenden Anfangs- und Endknoten. Schließlich wird der kürzeste Weg zwischen den zwei vorgegebenen Knoten des entstandenen Graphen berechnet, wie z.B. der rote Segmentzug in Abbildung 6.10 c) zeigt. Dieses Problem kann bspw. durch Berechnung des Dijkstra Algorithmus gelöst werden und ist im englischen als „single-pair shortest path problem“ bekannt (Cormen et al., 2001).

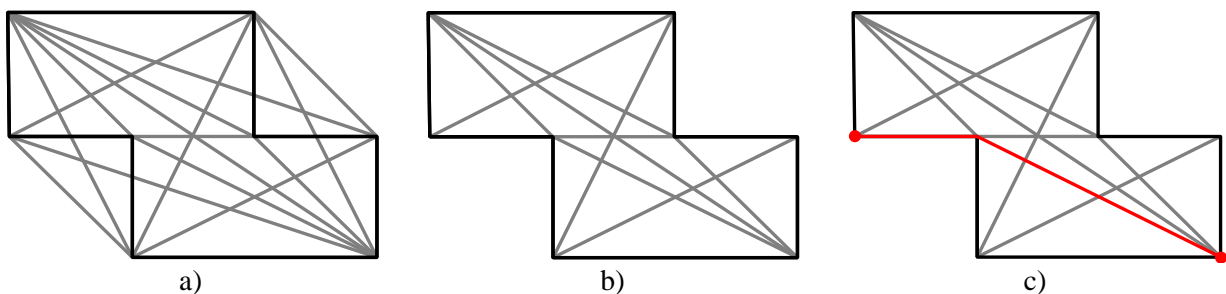


Abbildung 6.10: a) alle Verbindungen zwischen den Punkten des gelöschten Elements, b) der entstandener Graph, c) kürzester Weg innerhalb eines gelöschten Elements

Der kürzeste Weg innerhalb des gelöschten Elements wird zwischen denselben Anfangs- und Endpunkten gesucht, die bei der Berechnung der modifizierten Hausdorff-Distanz als die am weitesten liegenden Punkten identifiziert wurden. Dies ermöglicht es, den Vergleich dieser beiden Distanzen durchzuführen und auf dessen Grund die Form des gelöschten Elements zu beur-

teilen. Hierbei gilt, dass je höher der Wert der nach (6.8) berechneten Differenz ist, desto komplexer ist die Form des gelöschten Elements.

$$\text{Komplexität} = SP_{\text{single-pair}} - HD_{\text{Mod}} \quad (6.8)$$

Ein typisches Beispiel, bei dem der kürzeste Weg länger als die modifizierte Hausdorff-Distanz sein kann, ist durch die Konkavität des gelöschten Elements bedingt. Abbildung 6.11 veranschaulicht, dass in diesem Fall alle drei beschriebenen Charakteristiken unterschiedliche Ergebnisse liefern können.

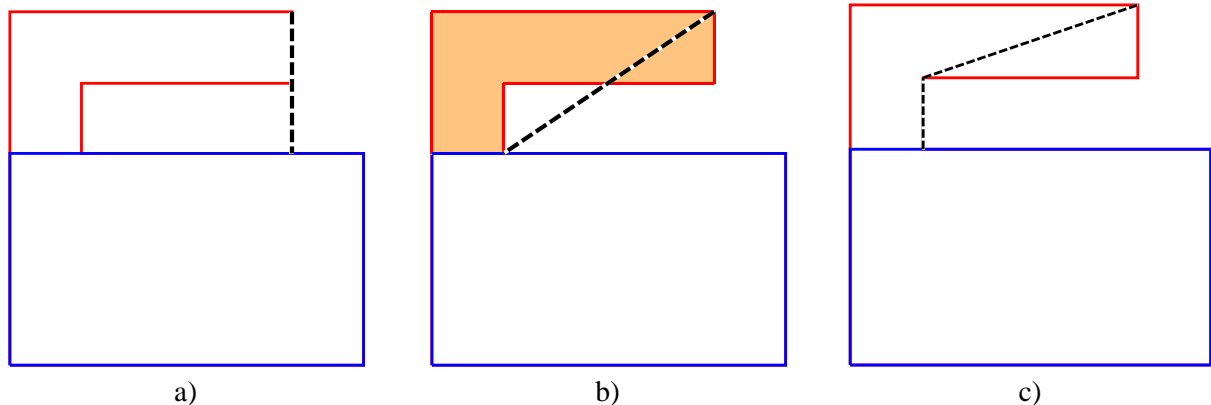


Abbildung 6.11: a) Hausdorff-Distanz, b) modifizierte Hausdorff-Distanz und c) kürzester Weg innerhalb eines konkaven Elementes

Da bei der Generalisierung die Wichtigkeit jedes einzelnen Elements für die Form des gesamten Grundrisses von Bedeutung ist, kann diese neben der Fläche auch durch die Komplexität bewertet werden. Abbildung 6.12 stellt dar, wie ein die Form kennzeichnender Teil des Grundrisses aufgrund dessen relativ kleiner Größe eliminiert werden kann.

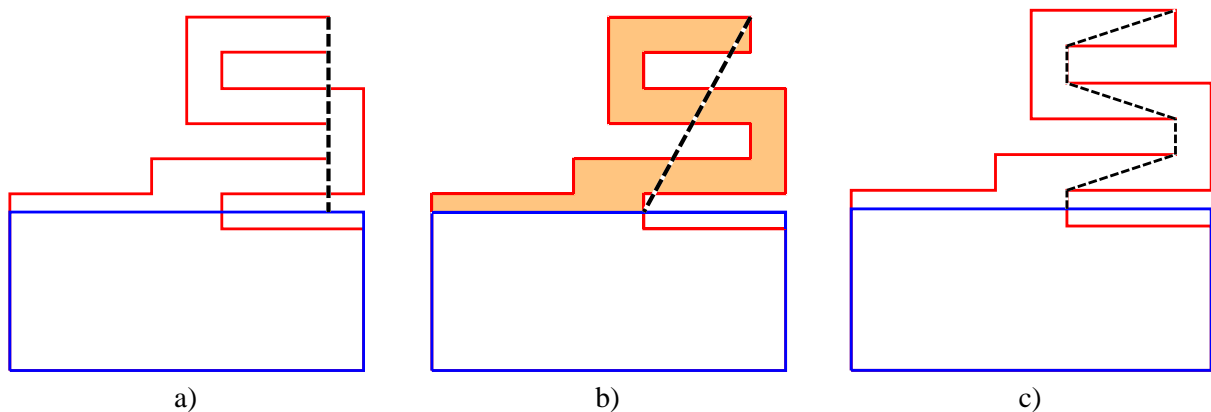


Abbildung 6.12: Komplexe Form eines gelöschten Elementes

Auf diese Weise wird durch die Hausdorff-Distanz und modifizierte Hausdorff-Distanz charakterisiert, inwieweit sich die zu vergleichenden Konturen voneinander unterscheiden, während der kürzeste Weg eher für die Berechnung der Komplexität des gelöschten Teils eines Grundrisses verwendet wird. Aufgrund der Komplexität kann weiterhin die Wichtigkeit dieses gelöschten Elements beurteilt werden, was auch für die Qualitätsbewertung der Generalisierung eingesetzt werden kann.

6.1.5. Komplexität eines gelöschten Elements

Wie der vorherige Abschnitt erläutert, ergibt sich aus dem Vergleich der modifizierten Hausdorff-Distanz und dem kürzesten Weg zwischen denselben Punkten eine neue Charakteristik eines gelöschten Elements, die dessen Formkomplexität beurteilen lässt. Dennoch kann der auf diese Weise berechnete kürzeste Weg an sich nicht weiter interpretiert werden, was hauptsächlich durch zwei Gründe bedingt wird. Zunächst besteht das Problem darin, dass der kürzeste Weg zwischen den zwei vorgegebenen Punkten nicht immer den tatsächlichen kürzesten Weg vom Punkt einer Kontur zu den Punkten der anderen Kontur darstellt. Ein Beispiel dafür ist in Abbildung 6.13 gezeigt. Hier ist der (fein gestrichelte) kürzeste Weg zwischen den Anfangs- und Endpunkten der (fett gestrichelten) modifizierten Hausdorff-Distanz im Fall a) länger als im Fall b), der vom (roten) Punkt auf der originalen Kontur zur generalisierten Kontur verläuft.

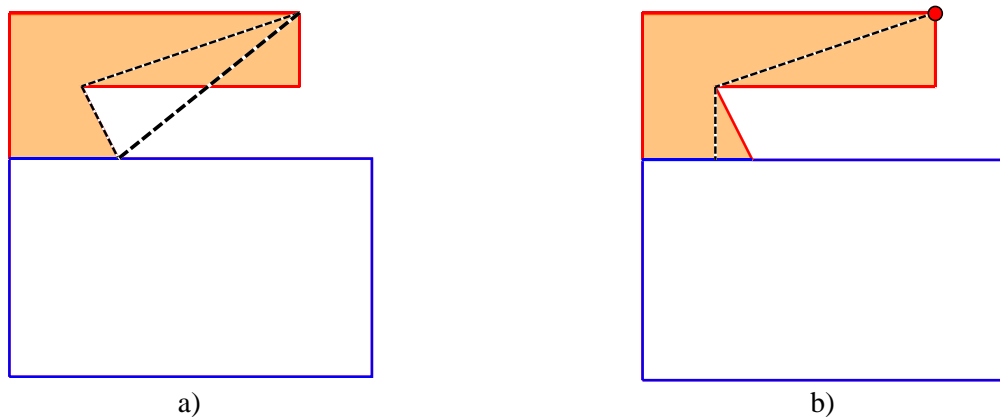


Abbildung 6.13: a) Modifizierte Hausdorff-Distanz und der kürzeste Weg zwischen deren Anfangs- und Endpunkten, b) der kürzeste Weg vom Punkt einer Kontur zur anderen Kontur

Eine weitere Schwierigkeit liegt darin, dass der Punkt auf einer Kontur, der laut dem kürzesten Weg maximal von der anderen Kontur entfernt ist, nicht unbedingt durch die modifizierte Hausdorff-Distanz identifiziert werden kann (siehe Abbildung 6.13). Die Diskrepanz, die zwischen den Grenzpunkten der modifizierten Hausdorff-Distanz und des längsten kürzesten Wegs innerhalb des gelöschten Elements auftreten kann, ist durch Abbildung 6.14 a) und b) illustriert.

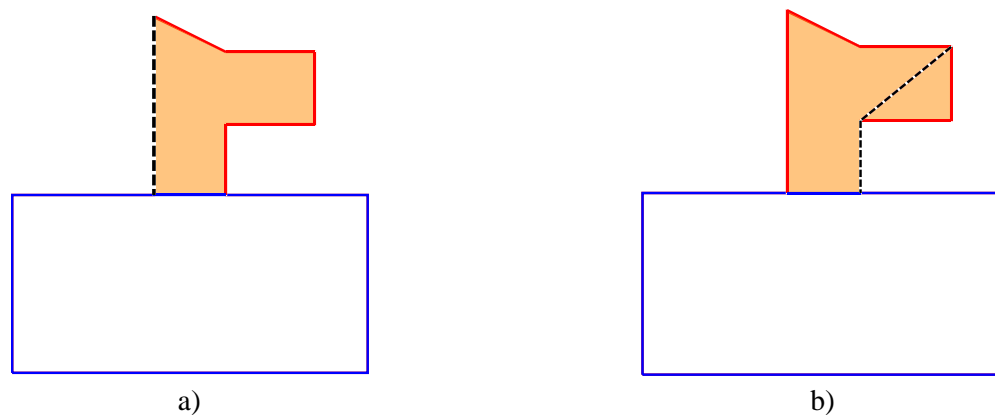


Abbildung 6.14: Unterschiedliche Anfangs- und Endpunkte a) der modifizierten Hausdorff-Distanz und b) des kürzesten Wegs

Demzufolge kann der kürzeste Weg zwischen den Anfangs- und Endknoten der modifizierten Hausdorff-Distanz nicht als die endgültige Lösung bei der Suche der maximalen Distanz zwischen zwei Konturen betrachtet werden. Aus den oben genannten Gründen muss dieser Parameter vervollständigt werden und vor allem dahingehend, dass er unabhängig von den anderen Charakteristiken berechnet werden kann.

Die Berechnung der maximalen Distanz zwischen den zwei Konturen wird unter den Bedingungen durchgeführt, dass diese ausschließlich innerhalb eines gelöschten Elements verlaufen darf und aus mehreren Liniensegmenten bestehen kann. Auf diese Weise werden auf der Kontur des gelöschten Elements zwei maximal entfernte Punkte gesucht, die jeweils in einem Überlappungsbereich dieser Kontur mit dem originalen und generalisierten Umriss liegen. In Analogie zur Hausdorff-Distanz ergibt sich das Endergebnis als der Maximalwert aus den in beide Richtungen berechneten maximalen kürzesten Wegen von einer Kontur zur Anderen.

Kürzester Weg vom Punkt zur Kontur

Als erster Schritt werden die kürzesten Wege innerhalb eines gelöschten Elements von jedem Punkt einer Kontur zu einer anderen Kontur berechnet. Zu diesem Zweck werden im entsprechenden Polygon der symmetrischen Differenz SD_i nach (6.2) und (6.3) die Bestandteile identifiziert, die zur originalen (rot) und generalisierten (blau) Kontur gehören (siehe Abbildung 6.15 a)). Danach wird aufgrund desselben Polygons ein Graph aufgebaut, wie es schon in Abschnitt 6.1.4 beschrieben wurde. Von allen Punkten einer Kontur werden die Senkrechten zu den Segmenten der anderen Kontur berechnet und die Verbindungen zu den Lotfußpunkten zu den schon generierten (grauen) Kanten des Graphen hinzugefügt. Dabei müssen diese ebenfalls innerhalb des gelöschten Elements liegen (siehe bspw. die schwarze Linie in Abbildung 6.15 a)). Nach der Gewichtung aller Kanten des entstandenen Graphen können die kürzesten Wege sukzessive von allen Knoten der Ausgangskontur zu den Knoten der anderen Kontur berechnet werden.

Zunächst werden von einem Startknoten die kürzesten Wege zu allen anderen Knoten des Graphen berechnet, wobei diese Aufgabe als engl. "single-source shortest path problem" bekannt ist. Anschließend wird aus den kürzesten Wegen vom Startknoten zu allen Knoten der anderen Kontur der Weg mit der Minimallänge gewählt. In Abbildung 6.15 b) sind der beliebig gewählte Startknoten auf der originalen Kontur und die alternativen Endknoten des Weges auf dem generalisierten Segment entsprechend mit rot und blau markiert. Der kürzeste Weg vom Startknoten zur generalisierten Kontur (blau) ist in Abbildung 6.15 c) fett gestrichelt dargestellt.

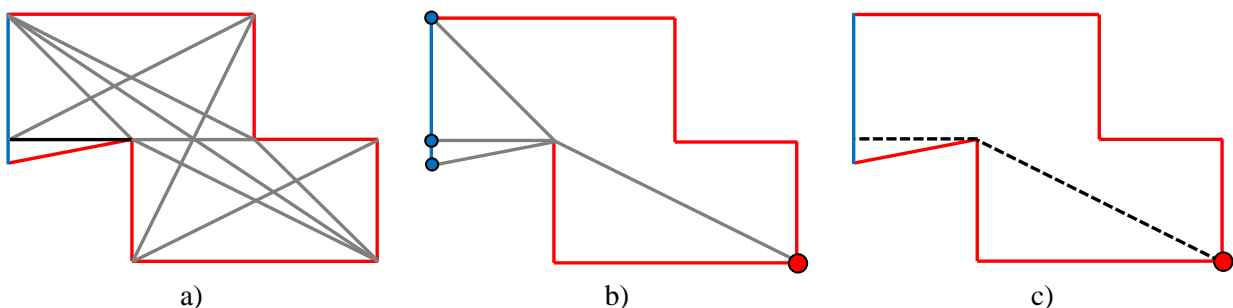


Abbildung 6.15: a) Die zusätzliche Verbindung (schwarz) im aufgrund des gelöschten Elements generierten Graphen, b) die kürzesten Wege vom Startknoten der originalen Kontur (rot) zu allen Knoten der generalisierten Kontur (blau) und c) kürzester Weg vom Startknoten zur generalisierten Kontur

Maximaler kürzester Weg

Im nächsten Schritt wird der Maximalwert aus allen kürzesten Wegen von jedem Punkt einer Kontur zur anderen Kontur ausgesucht und als die einseitige Maximaldistanz zwischen den beiden Konturen festgelegt. In Analogie zur Hausdorff-Distanz wird der maximale kürzeste Weg innerhalb des eliminierten Elements von einer Kontur zur Anderen ($MSP_i(O)$) und in umgekehrter Richtung ($MSP_i(G)$), wie in (6.9) und (6.10), geschätzt, da diese nicht unbedingt die gleichen Ergebnisse liefern.

$$MSP_i(O) = MSP(\partial O_i, \partial G_i) = MSP((\partial SD_i \cap O), (\partial SD_i \cap G)) \quad (6.9)$$

$$MSP_i(G) = MSP(\partial G_i, \partial O_i) = MSP((\partial SD_i \cap G), (\partial SD_i \cap O)) \quad (6.10)$$

Nachdem die gegenseitige Maximaldistanz von der zweiten Kontur zu der Ausgangskontur auf dieselbe Weise wie oben beschrieben berechnet wird, stellt das Maximum der beiden einseitigen Distanzen die gesuchte Maximaldistanz zwischen der originalen und generalisierten Kontur innerhalb des betrachteten gelöschten Elements MSP_i dar. Da der maximale kürzeste Weg aus allen möglichen Verbindungskombinationen zwischen jeweils einem Knoten des originalen und generalisierten Liniensegments gesucht wird, kann diese Aufgabe als engl. "all-pairs shortest path problem" bezeichnet werden.

$$MSP_i = \max(hd_i(O), hd_i(G)) \quad (6.11)$$

Letztendlich kann die maximale Abweichung zwischen den Konturen des originalen und generalisierten Grundrisses als der Höchstwert der maximalen kürzesten Wege für alle gelöschten Elemente nach (6.12) berechnet werden.

$$MD = \max(MSP) \quad (6.12)$$

Komplexität eines konkaven Elements

Die Beispiele in Abbildung 6.14 sowie in Abbildung 6.16 b) zeigen, dass die Länge der modifizierten Hausdorff-Distanz und des maximalen kürzesten Weges nicht immer sinnvoll verglichen werden können, da diese sich nicht unbedingt auf die gleichen Knoten stützen. Aus diesem Grund kann die Komplexität des gelöschten Elements als die Differenz zwischen der Länge des maximalen kürzesten Weges und der direkten Distanz zwischen dessen Anfangs- und Endknoten, die mit den Indizes 1 und n kenngezeichnet sind, berechnet werden. Dementsprechend kann (6.8) auf folgende Weise ungeschrieben werden:

$$\text{Komplexität} = MSP - d(MSP_1, MSP_n) \quad (6.13)$$

Abbildung 6.16 a) und c) illustrieren die Elemente der beiden Komplexitätsberechnung nach (6.8) und (6.13) und veranschaulichen die Ungenauigkeit der ersten Formel.

Auf diese Weise kann die Komplexität eines gelöschten Elements nach (6.13) vollständig aufgrund des maximalen kürzesten Weges berechnet werden. Diese Charakteristik kann neben der modifizierten Hausdorff-Distanz, die den maximalen Abstand zwischen der originalen und generalisierten Kontur zum Ausdruck bringt, für die Qualitätsbewertung der Generalisierungsergebnisse verwendet werden.

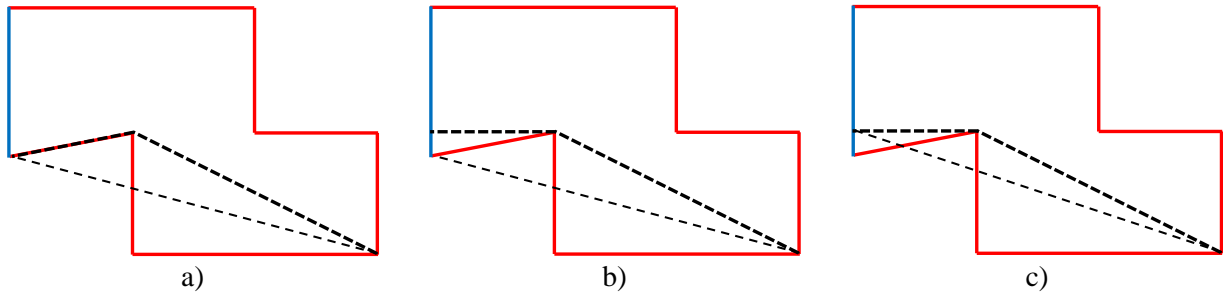


Abbildung 6.16: a) Komplexität des gelöschten Elements aufgrund von modifizierter HD, b) Diskrepanz zum maximalen kürzesten Weg und c) endgültige Komplexität aufgrund des maximalen kürzesten Wegs

6.2. Konturüberlappung

Aufgrund des maximalen Abstands zwischen zwei Grundrissen, der nur den Extremfall der Abweichung charakterisiert, kann kaum eine Aussage über die allgemeine Konformität beider Konturen getroffen werden. Der Maximalabstand kann bspw. nur lokal an einer Stelle auftreten oder aber eine globale Abweichung der gesamten Kontur bedeuten. Um diese Fälle unterscheiden zu können, muss anstatt des Abstands der Anteil des originalen Umrisses quantifiziert werden, der nach der Generalisierung erhalten geblieben ist. Eine mögliche Charakteristik wäre die Betrachtung der Ränder beider Grundrisse, deren Konformität durch die Schnittmenge wie in Formel (6.14) ausgedrückt werden kann.

$$R_{Conform} = \partial O \cap \partial G \quad (6.14)$$

Diese exakte Lösung scheidet jedoch in der Praxis, da bei der Erfassung und Modellierung von Geodaten zufällige Fehler unvermeidbar sind und deshalb Ungenauigkeiten in einem definierten Rahmen toleriert werden müssen. Zudem verändern Generalisierungsalgorithmen oftmals die Ausrichtung von Liniensegmenten, um geometrische Bedingungen wie Kollinearität und Rechtwinkligkeit zu garantieren oder sogar zu erzwingen. Als Folge dieser auferlegten Zwänge weisen die generalisierten Modelle Unterschiede zu den originalen Grundrissen auf. Selbst kleinste Differenzen führen dazu, dass die strikt mathematisch formulierte Charakteristik keine Überlappung zwischen dem originalen und generalisierten Objekt identifizieren kann.

Um die Auswirkung der geometrischen Ungenauigkeiten zu eliminieren, kann dem Generalisierungsprozess ein Vorverarbeitungsschritt vorangehen, bei dem die Grundrisse hinsichtlich der Kollinearität und Rechtwinkligkeit angepasst werden. Es ist jedoch oftmals nicht erwünscht die originalen Daten zu verändern. Eine solche Anpassung ist auch nicht immer eindeutig zu lösen.

Eine alternative Lösung, um die Überlappung zweier Konturen zu bewerten, besteht darin, anstatt der absoluten geometrischen Übereinstimmung, diese mit einer gewissen Toleranz zu bestimmen. In diesem Fall werden in das Ergebnis auch die Teile des generalisierten Grundrisses mit einbezogen, die sich innerhalb eines Toleranzbereichs ε um die originale Kontur befinden. Ein solcher Puffer wird in der Geodäsie und Geoinformatik auch als Epsilon-Band bezeichnet und u.a. zur Modellierung der geometrischen Ungenauigkeit eingesetzt. Dabei darf der Parameter ε nicht zu groß gewählt werden, da dies ansonsten zu einem überschätzten Ergebnis führen kann. Vielmehr hat das Toleranzband nur den Zweck den Erfassungsfehler zu kompensieren, so

dass dessen Breite entsprechend minimal sein muss. Dementsprechend können die übereinstimmenden Linienabschnitte als die Schnittmenge des Puffers um die originale Kontur mit der generalisierten Kontur festgestellt werden, was Formel (6.15) ausdrückt:

$$R_{\text{Buffer}} = \text{Puffer}(\partial O) \cap \partial G \quad (6.15)$$

Im Vergleich zu (6.14) liefert die modifizierte Version auf den ersten Blick überaus plausible Ergebnisse. Bei genauerer Betrachtung offenbart sich jedoch, dass auch diese Vorgehensweise noch nicht perfekt ist. Ein wesentlicher Nachteil der sich durch die Verwendung des Puffers ergibt, ist, dass die resultierende Überlappung überschätzt wird und aus diesem Grund sich von der menschlichen Wahrnehmung etwas unterscheiden kann. Abbildung 6.17 a) stellt den relevanten Bereich dar, in dem sich die zu vergleichende Konturlinie befinden darf. Der tatsächliche Pufferbereich (vgl. Abbildung 6.17 b) ist jedoch größer und erstreckt sich auch um die Endpunkte herum. Diese Problematik soll genauer betrachtet werden.

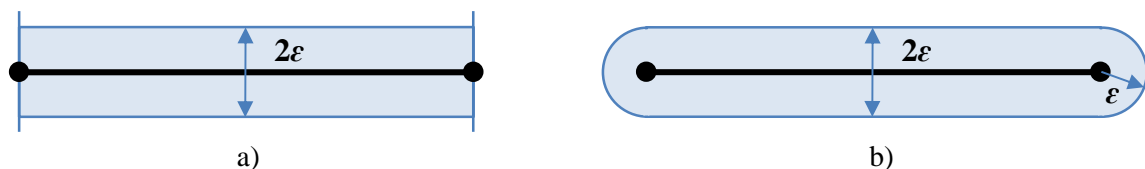


Abbildung 6.17: a) Abweichungsbereich und b) Toleranz-Puffer um ein Polygonsegment

Das eingeführte Toleranzband soll ausschließlich die Ungenauigkeiten zweier nahezu kollinearer Liniensegmente kompensieren. Durch die Verwendung des Puffers können drei Klassen von Fehlern auftreten, die anhand des Generalisierungsergebnisses (in Abbildung 6.19 a) im Folgenden diskutiert werden sollen.

Der erste Fall tritt aufgrund der abgerundeten Endbereiche auf. Am Ende eines Liniensegments schließt der Puffer noch Bereiche der generalisierten Linie mit ein, die sich weiter in dieselbe Richtung erstrecken. Der Linienvverlauf stimmt in diesem Bereich nicht mehr mit der originalen Kontur überein und sollte demnach nicht in das Ergebnis mit einfließen (Abbildung 6.19 b) markierter Bereich 1). Die Ungenauigkeiten, die dadurch entstehen, liegen im Bereich zwischen 0 und ε .

Dieses Problem kann auch dann nicht komplett behoben werden, wenn nur der relevante Toleranzbereich in Betracht gezogen wird. In manchen Fällen, wenn die generalisierte Linie aus dem Toleranzpuffer hinausgeht, können die unerwünschten Abschnitte tatsächlich ausgeschlossen werden, wie Abbildung 6.18 a) veranschaulicht. Dennoch werden sie bei einigen Konstellationen unvermeidbar mit in das Ergebnis aufgenommen (vgl. Abbildung 6.18 b). Dies ist dadurch bedingt, dass die generalisierte Linie am Ende des betrachteten originalen Liniensegments in den Toleranzbereich eines anderen Segments des Originalpolygons reinläuft. In dem Fall ist ein Fehler größer als ε zu erwarten. Ein solcher Lösungsansatz ist also nicht ausreichend.

Im Gegensatz zu dem ersten Fall haben die beiden anderen Ungenauigkeitsklassen nicht mit der Form, sondern vielmehr mit dem Konzept des Puffers selbst zu tun. Dabei werden auch noch diejenigen Teile der generalisierten Kontur mit einbezogen, die aufgrund der Verlaufsrichtung zwar nicht mit den originalen Linien assoziiert sein können, aber in dessen Puffer liegen. Bspw. entsteht der zweite Fall dadurch, dass der generalisierte Linienvverlauf vor der originalen Linie eine andere Richtung annimmt (Abbildung 6.19 b) Bereich 2). Diese sich anschließende Seite wird mit dem Puffer teilweise zusammenfallen. Je nach Position des Knickpunktes innerhalb des

Toleranzbandes ist in der Regel mit einem Fehler von 0 bis 2ε zu rechnen. Diese Grenzwerte entsprechen der Lage des Knickpunktes auf dem inneren und äußeren Rand des Puffers.

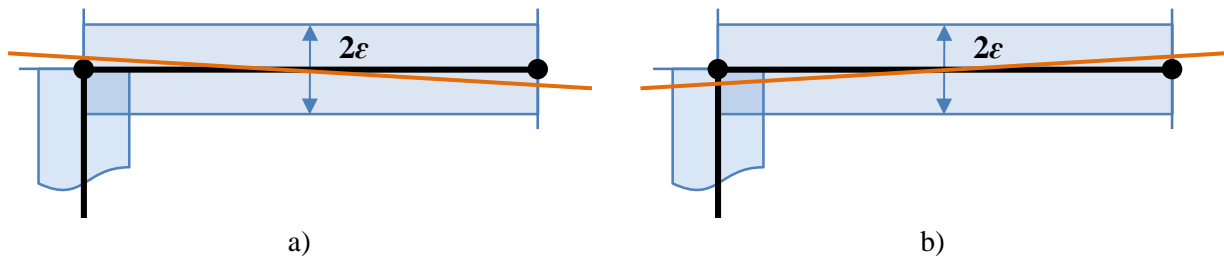


Abbildung 6.18: Abweichungsbereich um die Originalkontur (schwarz) und generalisierte Linie (orange)

Der dritte Fall tritt an den Stellen auf, wo die beiden Konturen sich geometrisch schneiden (Abbildung 6.19 b) Bereich 3). Die Größenordnung des Fehlers beträgt mindestens 2ε , wenn die Linien senkrecht aufeinander stehen. Ansonsten wächst er mit kleiner werdendem Winkel. Tabelle 6.1 führt die beschriebenen Fehler zusammen.

Daraus folgt, dass bei der obigen Formel noch mit Restfehlern zu rechnen ist, die es gilt, entsprechend zu kompensieren. Das zu große Endresultat, welches infolge der Einführung des Toleranzbandes entsteht, kann durch die Verwendung eines zweiten Puffers minimiert werden. Der Puffer wird um die restlichen Teile der generalisierten Kontur gebildet, die nicht zu dem nach (6.15) berechneten Schnitt gehören. Infolgedessen werden zu den Teilen auch die Bereiche der generalisierten Kontur mit aufgenommen, die annähernd gleich zu den überschätzten Bereichen des Schnitts sind. Die Grundidee besteht darin, dass durch die Verschneidung dieser beiden Puffer die unerwünschten Bereiche sich gegenseitig kompensieren, wie es in Abbildung 6.19 c) gezeigt ist. Die Größenordnung der überschätzten Konturbereiche und deren Ausgleich durch einen zweiten Puffer stellt Tabelle 6.1 dar

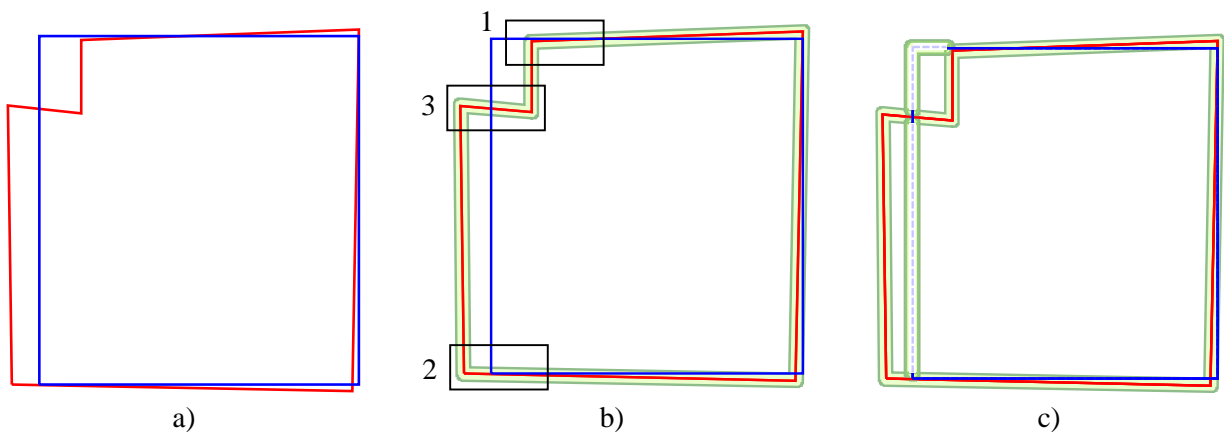


Abbildung 6.19: a) Originaler (rot) und generalisierter (blau) Grundriss, b) Puffer um den originalen Grundriss, c) Puffer um die nicht überlappenden Teile des generalisierten Grundrisses

Die Abbildungen, die den Schnitt des generalisierten Grundrisses mit dem einzelnen Puffer darstellen, zeigen, dass die Berechnung der überlappenden Konturbereiche nach (6.15) durch folgende Nachteile geprägt ist:

Nr.	Beschreibung	Betrag	Skizze	
			1 Puffer	2 Puffer
1	Zusätzlicher Bereich (Halbkreis mit Radius ε)	$0 \leq f \leq \varepsilon$		
2	Adjazente Kante der im Puffer liegenden Seite	$0 \leq f \leq 2\varepsilon$		
3	Geometrischer Schnitt zweier Konturen	$f \geq 2\varepsilon$		

Tabelle 6.1: Überschätzte Bereiche des Schnittes von generalisiertem Grundriss mit dem Puffer um die originale Kontur

1. Das Vorhandensein zu großer Bereiche ist unvermeidbar.
2. Es besteht eine positive Korrelation zwischen der Größe der unerwünschten Bereiche und der Breite des Epsilon-Puffers.
3. Die Vorgehensweise führt zu einer beträchtlichen Verfälschung des Ergebnisses. Ab einem bestimmten ε -Wert wird die Vergrößerung der Schnittlänge nur durch das Wachstum der Länge der unerwünschten Bereichen bedingt.

Im Gegensatz dazu bietet die Lösung bei Verwendung des zweiten Puffers eine Möglichkeit ohne aufwändige Analysen das Ergebnis zu verbessern. Die Berechnung wird nach (6.16) durchgeführt:

$$R_{\text{Puffer}} = \partial G \setminus \text{Puffer}(\partial G \setminus \text{Puffer}(\partial O)) \quad (6.16)$$

Formal kann diese Vorgehensweise in vier Schritte unterteilt werden, deren graphische Ergebnisse in Abbildung 6.20 nacheinander dargestellt sind.

1. Um das originale Polygon wird ein Puffer mit der Breite ε gebildet.
2. Die Verschneidung dieses Puffers mit der generalisierten Kontur wird berechnet.
3. Ein zweiter Puffer mit der Breite ε wird um die restlichen Teile des generalisierten Grundrisses gelegt.
4. Die Differenz zwischen der generalisierten Kontur und dem Puffer wird gefunden.

Aus dem Vergleich der Konturüberlappung nach (6.15) und (6.16) (siehe Abbildung 6.20 b) bzw. d)) kann festgestellt werden, dass das zweite Ergebnis besser der intuitiven Lösung entspricht. Obwohl es immer noch kleine Ungenauigkeiten enthält, sind diese dennoch um eine Größenordnung kleiner als bei der Verwendung des einzelnen Puffers.

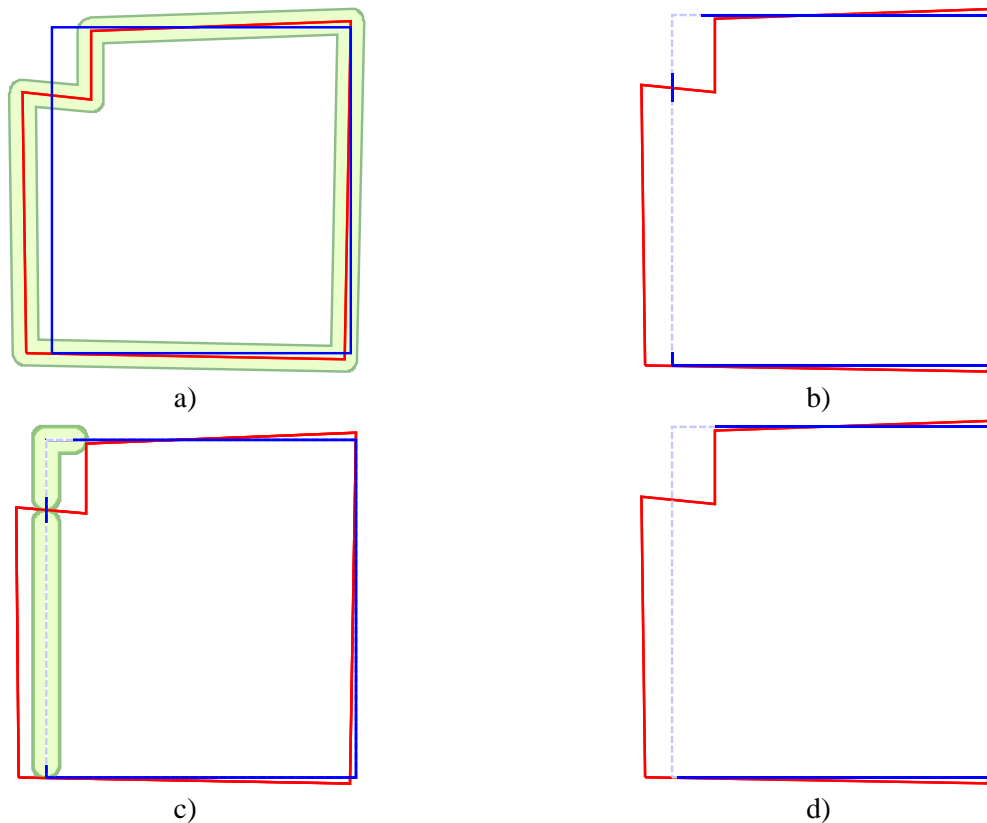


Abbildung 6.20: Schritte der Berechnung der Konturüberlappung

6.2.1. Bezug auf originale oder generalisierte Kontur

Da die Größe von Gebäuden sehr unterschiedlich sein kann, hat der absolute Wert der Konturüberlappung wenig Aussagekraft. In dem Fall ist der prozentuelle Anteil, der nach der Generalisierung gleich gebliebenen Konturteile, viel anschaulicher. Dabei stellt sich die Frage in Bezug auf welchen Grundriss diese Charakteristik definiert sein soll: auf den originalen oder generalisierten. Diese Vorgehensweise verfolgt hauptsächlich das Ziel, die Ergebnisse der Qualitätsbewertung von verschiedenen Grundrissen innerhalb eines Datensatzes zu vereinheitlichen. Es ist zu beachten, dass der Vergleich von alternativen Generalisierungen desselben Objekts auch sinnvolle Ergebnisse liefern muss.

Zur Erfüllung des ersten Zwecks kann angenommen werden, dass die identisch generalisierten Grundrisse auch gleich bewertet sein sollen. In diesem Fall wird die Konturüberlappung im Verhältnis zur generalisierten Kontur berechnet. Die Abbildung 6.21 zeigt drei unterschiedliche Grundrisse, denen ein und dasselbe vereinfachte Polygon entspricht. Diese Charakteristik reflektiert, dass der gleich große Anteil des generalisierten Polygons mit der Originalkontur übereinstimmt.

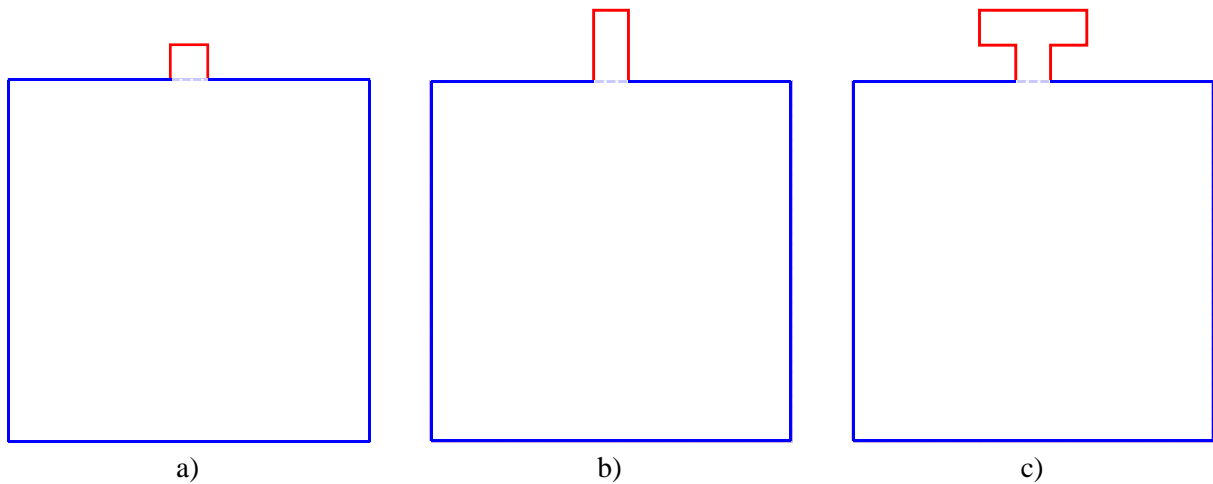


Abbildung 6.21: Gleiche Generalisierung verschiedener Grundrisse

Bei einer solchen Berechnung bleibt der Verlauf der eliminierten Abschnitte des originalen Objekts unbeachtet. Einerseits ist es sinnvoll angesichts der Tatsache, dass diese Konturelemente neben einem ziemlich langen Umriss eine geringe Bedeutung für die allgemeine Struktur des Grundrisses aufweisen können. Bspw. hat der Umriss des Vorsprungs in Abbildung b) eine Länge, welche der Hälfte der langen Polygonseite entspricht, ist jedoch aufgrund der kleinen Fläche relativ unbedeutend. Andererseits sind alle Teile der Kontur gleich wichtig und der Flächeninhalt, den sie umgrenzen, soll nicht in Betracht gezogen werden. Der größte Nachteil der Normierung durch die Fläche des generalisierten Objekts besteht darin, dass der Qualitätswert mit der Veränderung des Umfangs des generalisierten Polygons variiert. Das heißt, bei gleicher Konturüberlappung und unterschiedlicher Konturlänge von alternativen Generalisierungen von ein und demselben Objekt wird sich die Qualitätsgröße auch ändern. Dies veranschaulicht Abbildung 6.22 a) und b). Aus demselben Grund wird die Generalisierung c) trotz der größeren Konturüberlappung ungefähr gleich wie b) bewertet (siehe Tabelle 6.2).

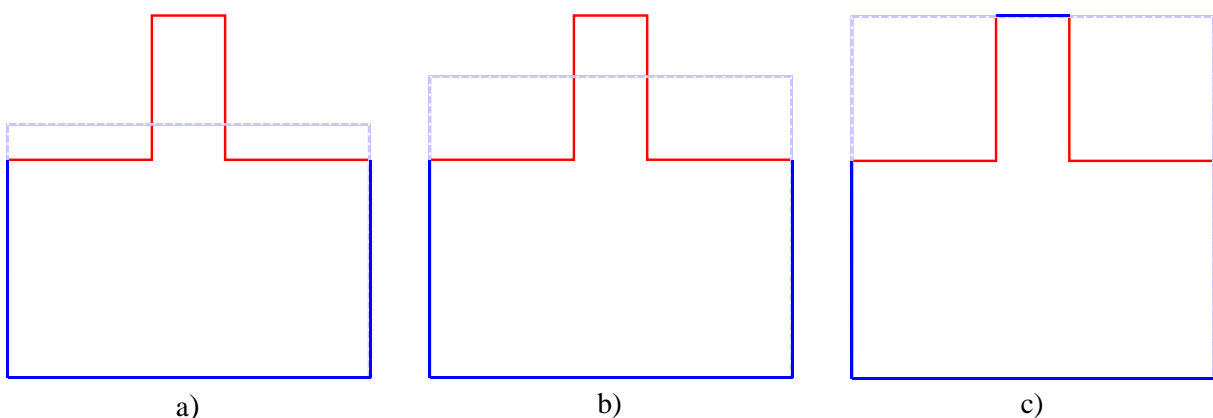


Abbildung 6.22: Alternative Generalisierungen eines Grundrisses

Nr.	Generalisierte Kontur	Konturüberlappung	Bewertung von Konturüberlappung, %
a)	34	22	65
b)	36	22	61
c)	40	24	60

Tabelle 6.2: Bewertung von Konturüberlappung in Bezug auf generalisierten Grundriss

Wie daraus folgt, ist die Normalisierung durch die Länge des generalisierten Grundrisses insbesondere dann ungünstig, wenn mehrere Generalisierungsmöglichkeiten eines Objekts untereinander qualitativ verglichen werden sollen. Da diese Aufgabe die höchste Priorität bei der Qualitätsbewertung hat, wird eine angemessenere Lösung benötigt.

Dem gegenüber kann die Konturüberlappung im Verhältnis zum Originalgrundriss berechnet werden. Diese Charakteristik ist nur von der Konturüberlappung abhängig, da die Länge des Originalumrisses konstant bleibt. Auf diese Weise werden in Abbildung 6.23 die Generalisierungen a) als die beste und b) die zweitbeste bewertet, wobei der Vorsprung entweder komplett eliminiert oder vollständig in das Ergebnis mit aufgenommen wird. Alle übrigen Zwischenpositionen der generalisierten Linie werden gleich geschätzt.

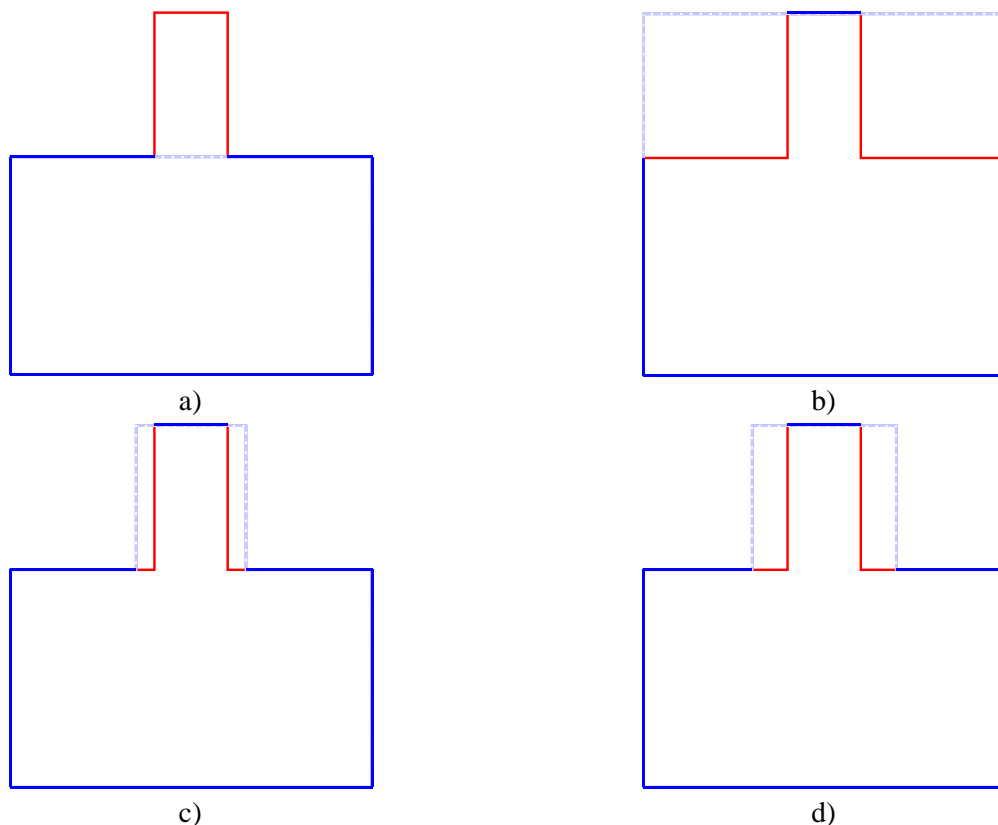


Abbildung 6.23: Generalisierung durch Vereinfachung und Betonung eines Vorsprunges

Ein anderer Fall ergibt sich, wenn der Vorsprung nicht entfernt, sondern betont wird. Dabei kann laut der diskutierten Qualitätscharakteristik auch ein besseres Ergebnis als in a) erreicht werden (vgl. Abbildung 6.23 c). Die Bewertung wird umso besser, je weniger der Vorsprung verbreitert wird. Demzufolge wird die beste Qualität dann erzielt, wenn der Generalisierungsschwellwert gerade überschritten wird, sodass dieses Element des Grundrisses beibehalten werden können. Die Generalisierung d) wird gleich wie a) bewertet und die weitere Verbreiterung des Vorsprunges wird ab dem Punkt zu einer Verschlechterung des Ergebnisses führen. Der Vergleich von den resultierenden Bewertungen in Bezug auf die originalen und generalisierten Objekte ist in Tabelle 6.3 gegeben.

Den Beispielen zufolge reflektiert die betrachtete Qualitätscharakteristik die Zu- oder Abnahme der absoluten Länge der Konturüberlappung, was im Gegensatz zum ersten Vorschlag einen adäquaten Vergleich der alternativen Generalisierungen ermöglicht. Daraus kann die Schlussfol-

gerung gezogen werden, dass die Normalisierung des Wertes der Konturüberlappung durch die Umfanglänge der Originalkontur besser für die erforderliche Qualitätscharakteristik geeignet ist.

Nr.	Konturlänge		Konturüberlappung	Bewertung	
	O	G		O	G
a)	40	32	30	75	94
b)	40	40	24	60	60
c)	40	39	31	77	79
d)	40	40	30	75	75

Tabelle 6.3: Vergleich von Bewertung der Konturüberlappungen im Bezug auf originalen und generalisierten Grundriss

6.2.2. Normalisierung der Konturüberlappung

Im vorherigen Abschnitt wurde erörtert, dass es für die vernünftige Gegenüberstellung mehrerer alternativer Generalisierungslösungen sinnvoll ist, die Ergebnisse auf einen konstanten Wert zu beziehen. Da die Länge des generalisierten Grundrisses sich von Fall zu Fall unterscheidet, wurde gezeigt, dass der Umfang der Originalkontur eine bessere Grundlage zu diesem Zweck ist. Es gibt jedoch einige Ausnahmefälle, für die die Korrektheit dieser Vorgehensweise in Frage gestellt werden kann.

Wegen der Generalisierung wird die Kontur eines Objekts verändert, wodurch die Umrisslinie sich im Normalfall infolge des Entfernens von Elementen verkürzt. In einigen Fällen kann sie aber auch länger werden. In der Regel kommt dies dann vor, wenn ein abgerundeter Teile des Grundrisses durch rechteckige Segmente ersetzt oder ein Eckversprung weggelassen wird (siehe Abbildung 6.24 a) bzw. b)). Das ist nicht problematisch, da die Qualitätscharakteristik widerspiegelt, dass die Übereinstimmung zwischen den zwei Konturen nicht vollständig ist.

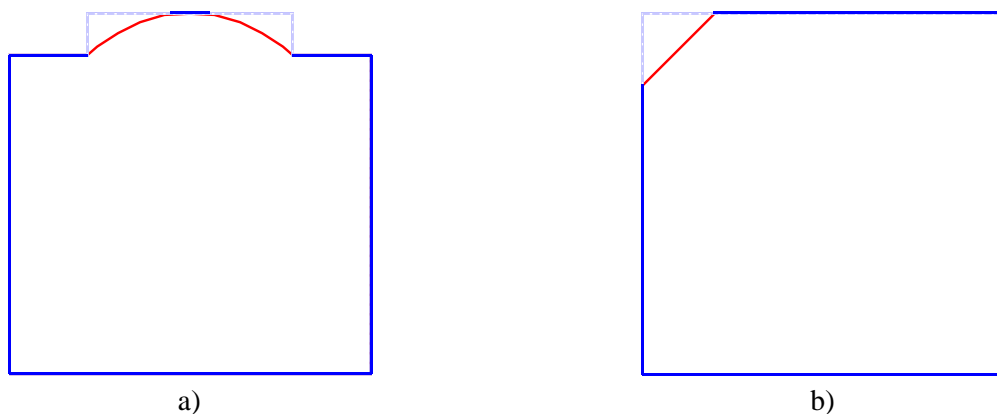


Abbildung 6.24: Elemente eines Grundrisses, die nach der Vereinfachung länger werden
a) abgerundete Fassadenlinie, b) weggelassener Eckversprung

Schwierigkeiten können aber dann auftreten, wenn bei der Generalisierung keine topologischen Änderungen erforderlich sind und die Geometrie des Grundrisses nur hinsichtlich der Rechtwinkligkeit und Kollinearität angepasst wird. Diese Modifizierung ist in der Regel geringfügig und führt typischerweise dazu, dass der generalisierte Grundriss trotz der kleinen Abweichungen vom Originalobjekt komplett in dessen Puffer liegt, wie Abbildung 6.25 a) zeigt. In diesem Fall wird der normalisierte Wert der Qualitätscharakteristik 100 % überschreiten, was natürlich kein vernünftiges Ergebnis ist. Um solch eine Situation zu vermeiden, kann angenom-

men werden, dass die übersteigenden Werte der Konturüberlappung der Maximalgröße von 100 % gleichgesetzt werden. Diese Qualitätscharakteristik lässt sich wie in (6.17) berechnen und wird als Anteil der Konturüberlappung (engl. „rate of outline intersection“) bezeichnet:

$$R_{OI} = \min\left(\frac{\text{Länge}[\partial G \setminus \text{Puffer}(\partial G \setminus \text{Puffer}(\partial O))]}{\text{Länge}[\partial O]}, 1.0\right) \quad (6.17)$$

Hingegen kann aufgrund der geometrischen Anpassung passieren, dass der generalisierte Umriss kürzer wird, was zur Folge den Qualitätswert unter 100 % hat. Hier stellt sich die Frage, ob die Generalisierung in Abbildung 6.25 b) qualitativ schlechter bewertet sein soll, obwohl diese auch komplett im Puffer der Originalkontur enthalten ist (vgl. Abbildung 6.25 a).

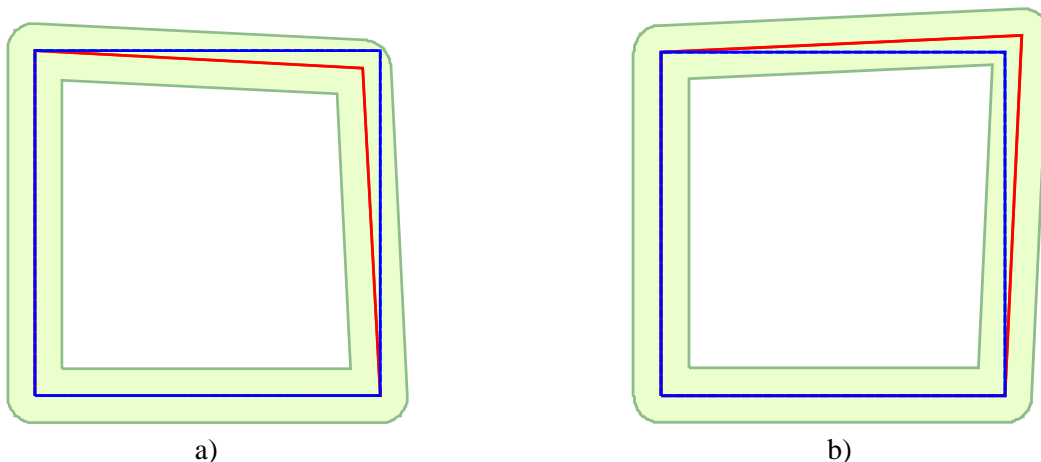


Abbildung 6.25: Originale Kontur, deren Länge kleiner ist als der Umfang des generalisierten Grundrisses

Daraus kann man schließen, dass die Fälle, bei den ein generalisierter Grundriss vollständig im Toleranzbereich der Originalkontur liegt, gesondert betrachtet werden müssen. Hierbei ist es sinnvoll, die hundertprozentige Überlappung anzunehmen, unabhängig davon, ob die Umrisslinie des generalisierten Objekts nach der Generalisierung länger oder kürzer geworden ist. Die entsprechende Berechnung kann nach (6.18) durchgeführt werden:

$$R_{OI} = \begin{cases} \frac{\text{Länge}[\partial G \setminus \text{Puffer}(\partial G \setminus \text{Puffer}(\partial O))]}{\text{Länge}[\partial O]} & , \text{für } \frac{\text{Rand}_{\text{Puffer}}}{\text{Länge}[\partial G]} \neq 1.0 \\ 1.0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (6.18)$$

Prinzipiell legt diese Vorgehensweise fest, dass zwei Konturen als gleich zu betrachten sind, wenn der Abstand zwischen deren Umrissen einen vordefinierten Schwellwert nicht überschreitet. Der Vergleich zweier Objekte mit einer bestimmten Toleranz wird oftmals bei Matching-Verfahren verwendet.

7 Flächenbezogene Charakteristiken

Die aufgrund der Generalisierung resultierenden Veränderungen an Grundrissen können nicht nur mittels Abstandsparameter berechnet werden. Vielmehr ist die Veränderung der räumlichen Erstreckung eines Objekts eine weitere signifikante Charakteristik und zieht die Fläche der Objekte in Betracht. Im Unterschied zur Umfangslänge, die infolge der Generalisierung zumeist kürzer wird, kann der Flächeninhalt eines Objekts sowohl vergrößert als auch verkleinert werden, indem Elemente eliminiert oder Teile hinzugefügt werden. In diesem Kapitel werden die Objekte deshalb aufgrund ihrer Fläche verglichen und die Besonderheiten dieser Vorgehensweise detailliert erläutert. Es folgt eine Definition der Strukturelemente der Flächenveränderung und eine Erklärung zu deren Rolle für die räumliche Ausdehnung der Objekte. Darauf basierend werden die Qualitätscharakteristiken aufgestellt, die gemeinsam solche Eigenschaft wie die Flächentreue des generalisierten Objekts im Vergleich zu dessen Original zum Ausdruck bringen. Ähnlichen Charakteristiken finden in (Henricsson and Baltsavias, 1997) zum Zweck der Beurteilung der 2D-Abdeckung von rekonstruierten 3D-Gebäuden im Vergleich mit gegebenen Grundrissen Erwähnung. Wobei die Berechnungen zur Vereinfachung im Rasterraum durchgeführt werden.

Wie im vorherigen Kapitel werden die Ähnlichkeitsmaße für den Vergleich der Flächeninhalte zweier Objekte anhand der mengentheoretischen Operatoren formuliert. Hier wird ein Objekt als Ganzes betrachtet, was dem regionenbasierten Ansatz entspricht. Auf diese Weise wird nicht nur der Objektrand, sondern auch das Innere bzw. der Abschluss der objektbildenden Punktmenge berücksichtigt (siehe Abschnitt 4.2.1).

7.1. Flächenveränderung

Die Flächenveränderungen von Objekten können aus der quantitativen und der räumlichen Perspektive geschätzt werden (siehe Anhang B.3.2). Auf diese Weise kann der Vergleich des originalen und generalisierten Grundrisses, wie in (Podolskaya et al., 2007), ausschließlich aufgrund des Betrags der Flächen durchgeführt werden. Ein solcher Ansatz ermöglicht es festzustellen, wie die Objektfläche quantitativ verändert wurde. Jedoch können darauf basierend keine Schlussfolgerungen über die Erstreckung der Objekte hinsichtlich einander gezogen werden. Dies kann als räumliche Umgestaltung eines Objekts nach der Generalisierung interpretiert werden. Da diese zwei Vorgehensweisen verschiedene Aspekte der Flächenveränderung zum Ausdruck bringen, ist es sinnvoll, den Zusammenhang zwischen den beiden aufzudecken und, wenn möglich, diese zu vereinigen.

Wie oben erwähnt, wird ein Objekt im Folgenden mit dem Abschluss einer Punktmenge assoziiert. Die durch die Generalisierung beibehaltene Fläche kann als gemeinsamer Bereich zwischen den Objekten betrachtet werden und wird in diesem Fall als Schnittmenge zwischen den Grundrissen vor und nach der Veränderung berechnet. Seien O und G die Punktfolgen, die jeweils ein originales und generalisiertes Polygon bilden. Deren Schnittmenge wird durch (7.1) ausgedrückt:

$$Area_{unmodified} = O \cap G \quad (7.1)$$

Die geometrische Interpretation als Schnittfläche beider Objekte wird in Abbildung 7.1 mit Lila gekennzeichnet. Es sind einige Vorteile bei der Verwendung der Schnittfläche gegenüber der einfachen Flächendifferenz zu erwähnen. Zum einen garantiert eine Gleichheit der Beträge der Flächen nicht, dass die betrachteten Objekte sich komplett überlappen, wie Abbildung 7.1 a)

demonstriert. Zum anderen können bei der gleichen Differenz zwischen den Objektflächen Schnittbereiche unterschiedlicher Konfiguration und Beträge entstehen (vgl. Abbildung 7.1 b) und c)). Auf diese Weise wird die Ähnlichkeit der Objekte nach (7.1) unter Berücksichtigung deren relativen räumlichen Position eingeschätzt.

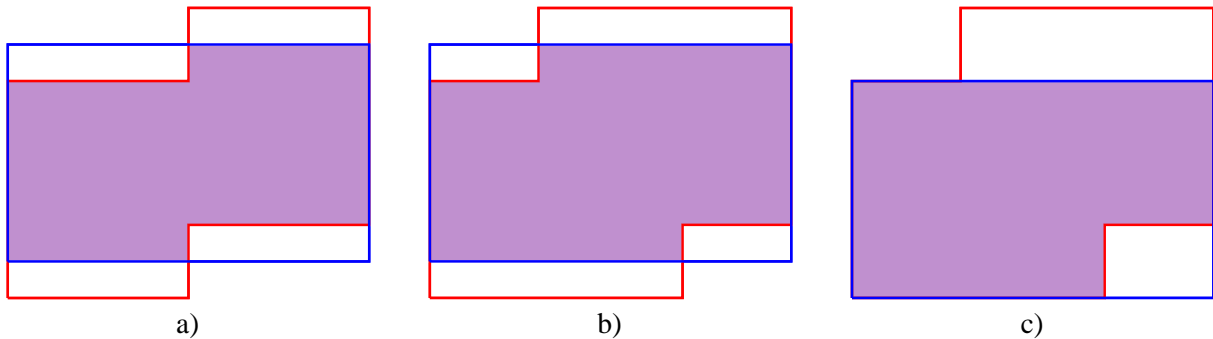


Abbildung 7.1: Ähnlichkeit des originalen und generalisierten Grundrisses aufgrund deren Schnittfläche

Der gemeinsame Bereich beider Objekte ist ein aussagekräftiger Parameter, jedoch ist eigentlich die Charakterisierung der räumlichen Verlagerung der Fläche von Interesse. D.h. die strukturellen Veränderungen am originalen Objekt, die bspw. durch Zuwachs oder Abnahme an der Fläche im Rahmen der Simplifizierung entstehen können. Diese hat in verschiedenen Quellen diverse Bezeichnungen bekommen, wie z.B. „area of protrusion and recess“ (Burghardt et al., 2007) oder „insertions and deletions“ (Bouziani et al., 2010). Im Folgenden werden diese Flächen basierend auf der Schnittfläche definiert.

Die Differenz zwischen der originalen Fläche und dem gemeinsamen Bereich beider Polygone stellt die gelöschten Teile des originalen Objekts dar, die im Folgenden als Intrusionen bezeichnet werden. Dem entgegen werden die hinzugefügten Flächen, die vor der Generalisierung noch nicht zum originalen Grundriss gehört haben, als Extrusionen definiert. Diese Bereiche können als Differenz zwischen dem vereinfachten Objekt und dem Schnittbereich geschätzt werden. Diese Strukturelemente der Flächenveränderung sind in Abbildung 7.2 gezeigt, wobei die Intrusionen rot und die Extrusionen blau markiert sind.

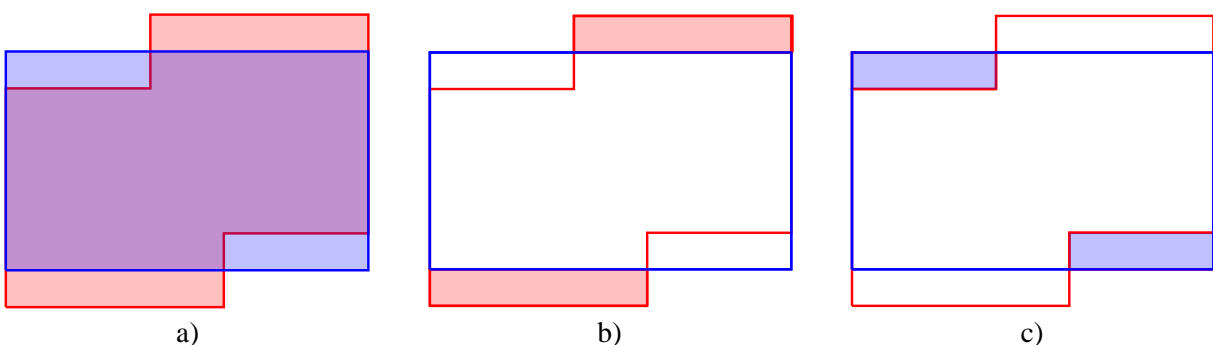


Abbildung 7.2: a) Überlappung zweier Grundrisse, b) Intrusionsflächen, c) Extrusionsflächen

Die Intrusionen und Extrusionen können in Übereinstimmung mit der Mengenlehre durch den Differenzoperator zwischen zwei zu vergleichenden Objektmengen berechnet werden. Da die veränderten Flächen in Bezug auf den originalen Grundriss definiert sind, werden diese im Folgenden als $I(O)$ für Intrusionen und $E(O)$ für Extrusionen bezeichnet. Die beiden Charakteristiken werden entsprechend durch (7.2) und (7.3) ausgedrückt:

$$I(O) = (O \setminus G) \quad (7.2)$$

$$E(O) = (G \setminus O) \quad (7.3)$$

Die Intrusionen und Extrusionen können als ein guter Ausgangspunkt für die weitere Charakterisierung der Veränderung in Bezug auf die räumliche Erstreckung eines Objekts dienen. Dies wird im nächsten Abschnitt diskutiert.

7.2. Qualitätsforderungen bezüglich der Flächenveränderung

Bei der Bewertung der räumlichen Umstrukturierung eines Objekts können grundsätzlich zwei Bedingungen aufgestellt werden, deren Erfüllungsgrad als Qualitätsmaße für das generalisierte Objekt verwendet werden kann. Die erste Voraussetzung besteht darin, dass der Betrag der unveränderten Fläche nach der Generalisierung möglichst groß sein soll. Übertragend auf die Definition der Veränderungsflächen, die im vorherigen Abschnitt eingeführt wurde, sollen die summierten Werte der Intrusionen und Extrusionen möglichst gering sein. Auf diese Weise werden die Bereiche der entfernten und hinzugefügten Elemente des originalen Grundrisses gemeinsam berücksichtigt. Laut dem Anhang B.3.2 ist die gesamte Differenz zwischen zwei Mengen als symmetrische Differenz bezeichnet. Dementsprechend können die gemeinsamen Veränderungsflächen des originalen Objekts durch die symmetrische Differenz wie in (B.32) identifiziert werden, wobei diese Charakteristik laut (7.2) und (7.3) wie folgt umgeschrieben werden kann:

$$SD = I(O) \cup E(O) \quad (7.4)$$

Aufgrund des besten Wertes dieser Charakteristik, der gleich Null ist, kann die Aussage getroffen werden, dass infolge der Generalisierung keine Veränderung des Objekts stattgefunden hat. Dabei weist der originale und generalisierte Grundriss die komplette Übereinstimmung auf. Dieses Ergebnis kommt in den meisten Fällen dann vor, wenn alle Elemente des originalen Objekts die Mindestgrößen, die den Generalisierungsvorgang initiieren, überschreiten.

Um die in dieser Arbeit verwendeten Formulierungen zu vereinheitlichen, wird die Verbindung zwischen den mengentheoretischen Bezeichnungen und den absoluten Beträgen der Objekteigenschaften hergestellt. Somit wird unter dem Ausdruck $A(M)$ der absolute Flächenbetrag der Figur verstanden, die durch die Menge M gebildet wurde. Dementsprechend kann der absolute Betrag der Flächendifferenz wie in (7.5) ausgedrückt werden:

$$SD = A(I) + A(E) \quad (7.5)$$

Sogar wenn die Vereinfachung eines Objekts unvermeidlich ist, sollte zumindest der Flächenbetrag vor und nach der Generalisierung gleich bleiben. Dabei handelt es sich um den rein quantitativen Unterschied zwischen den Flächeninhalten zweier Objekte:

$$AD = A(O) - A(G) \quad (7.6)$$

Wie Abbildung 7.2 b) und c) zu entnehmen ist, können die Flächen des originalen und generalisierten Grundrisses als Vereinigung des gemeinsamen Bereichs beider Objekte mit den jeweiligen Intrusionen und Extrusionen ausgedrückt werden. Dabei stellen (7.7) und (7.8) die absoluten Beträge dieser Flächen vor:

$$A(O) = A(O \cap G) + A(I) \quad (7.7)$$

Aus (7.7) folgt, dass bei $A(I) = 0$ das originale Objekt komplett von dem generalisierten Grundriss überlappt wird. Dennoch heißt es bei weitem nicht, dass die Übereinstimmung zwischen den beiden Objekten hundertprozentig ist, da zu dem originalen Objekt einige neue Teile hinzugefügt werden können. Dies ist der Fall, wenn die Fläche des generalisierten Objekts größer als der Überlappungsbereich ist:

$$A(G) = A(O \cap G) + A(E) \quad (7.8)$$

Bei der Substitution der Flächenbeträge des originalen und generalisierten Grundrisses durch die in (7.7) und (7.8) eingeführten Formulierungen, kann die Flächendifferenz in (7.6) wie folgt umgeschrieben werden:

$$AD = A(I) - A(E) \quad (7.9)$$

Auf diese Weise bringt (7.9) den Zusammenhang zwischen der bekannten Charakteristik Flächendifferenz und den in dieser Arbeit eingeführten Elementen der symmetrischen Differenz zum Ausdruck. Dementsprechend wird die zweite Bedingung aufgestellt, die lautet, dass die Intrusions- und Extrusionsflächen möglichst gut gegeneinander ausgeglichen werden müssen. Im besten Fall beträgt die Flächendifferenz Null, was dem unveränderten Flächenbetrag des originalen Objekts entspricht. Das positive oder negative Vorzeichen dieser Charakteristik ermöglicht die Identifikation, ob die Fläche des originalen Grundrisses nach der Generalisierung vergrößert oder verkleinert wird.

Zusammenfassend werden für die Bewertung der Veränderung in der räumlichen Erstreckung eines Objekts zwei Bedingungen aufgestellt, deren Erfüllungsgrad jeweils durch die Charakteristiken symmetrische Differenz in (7.5) und Flächendifferenz in (7.9) ausgedrückt wird. Die aufgrund der Strukturelemente formulierten Flächenveränderungen, nämlich Intrusionen und Extrusionen, stellen zwei Charakteristiken für ein einheitliches System dar, dass den quantitativen und raumbezogenen Aspekt der Flächenveränderungen eines Grundrisses in Zusammenhang bringt.

7.3. Normalisierung der Flächencharakteristiken

Wie in der Einführung zu diesem Kapitel angedeutet wurde, kann die Fläche eines Objekts nach der Generalisierung sowohl kleiner als auch größer werden. Da die Normierung der Ähnlichkeitsmaße ein wichtiger Bestandteil der Qualitätsbewertung ist, stellt sich hier die Frage, wie mit den Flächencharakteristiken in diesem Fall umzugehen ist. Die übliche Vorgehensweise, die auch in (Frank and Ester, 2006; Podolskaya et al., 2007) verwendet wird, besteht darin, die Fläche des größeren Objekts als Normierungsfaktor einzusetzen (siehe Formel (5.3)). Dennoch wurde bisher nicht thematisiert, welche Auswirkung diese Art der Berechnung auf die Qualitätscharakteristiken haben kann, was im Folgenden anhand einiger Beispiele aufgeklärt wird.

In Abbildung 7.3 a) und b) werden zwei originale Gebäudegrundrisse (rot) mit einem Ein- und Vorsprung gleicher Größe gezeigt, die nach der Generalisierung (blau) eliminiert sind. Dies hat unterschiedliche Auswirkungen auf die Fläche, die im ersten Fall vergrößert und im zweiten Fall verkleinert wird. Trotz gleicher Beträge bei der Flächendifferenz AD (siehe Formel (7.9)), die sich nur durch das Vorzeichen unterscheiden, nämlich negativ für den Einsprung und positiv für den Vorsprung, ergeben sich durch die Normierung unterschiedliche Werte. Als Ergebnis wird

die Generalisierung für den Grundriss mit einem Vorsprung besser bewertet. Die dazugehörigen numerischen Ergebnisse werden zur besseren Anschaulichkeit in Tabelle 7.1 eingeführt.

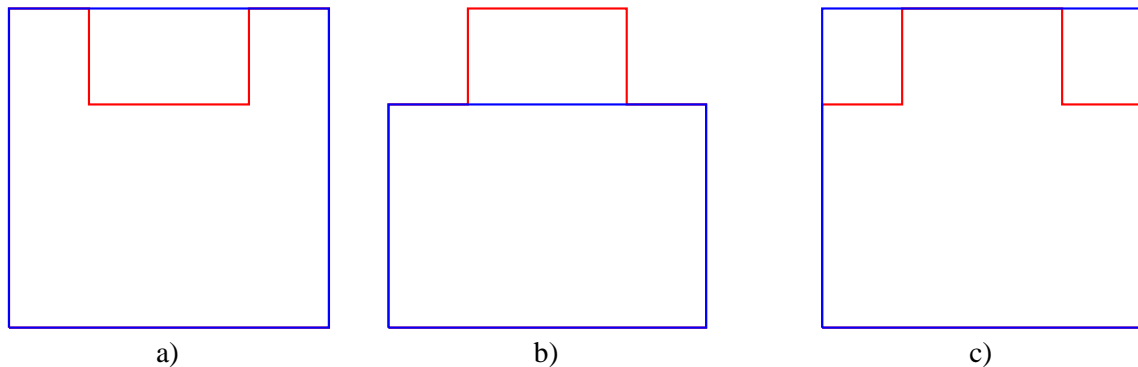


Abbildung 7.3: Eliminierte Elemente gleicher Größe und unterschiedliche Konfiguration

Nr.	Originale Fläche	Art der Veränderung	Größe der Veränderung	Generalisierte Fläche	Anteil der Veränderung	
					orig. Fläche	max(orig, gen)
a), c)	85	Extrusion	15,0	100	17,6 %	15,0 %
b)	85	Intrusion	15,0	70	17,6 %	17,6 %

Tabelle 7.1: Unterschiedliche Bewertung der Flächenveränderung in Abhängigkeit von der Berechnungsmethode

Das gleiche gilt auch für die alternativen Generalisierungen desselben Grundrisses (vgl. Abbildung 7.3 b) und c)), wobei der generalisierte Grundriss im zweiten Fall, der über die größere Fläche verfügt, besser bewertet wird.

Die Gesetzmäßigkeit, die die Diskrepanz zwischen den Bewertungsergebnissen der Generalisierungsqualität nach (4.3) entspricht, ist graphisch in Abbildung 7.4 dargestellt. Die beiden Kurven sind als Funktionen der absoluten Beträge der Flächendifferenz berechnet, deren mathematischen Formulierungen rechts von der Abbildung zu sehen sind. Solange die Fläche des originalen Objekts größer als die Fläche dessen Generalisierung bleibt, ist der Normierungsfaktor konstant, und das Ähnlichkeitsmaß ist proportional zum Betrag der Flächendifferenz (rot). Bei der größer werdenden Fläche des generalisierten Grundrisses ändert sich auch der Normierungsfaktor, wobei die Abhängigkeit durch die Größe der Flächendifferenz bestimmt ist (grün).

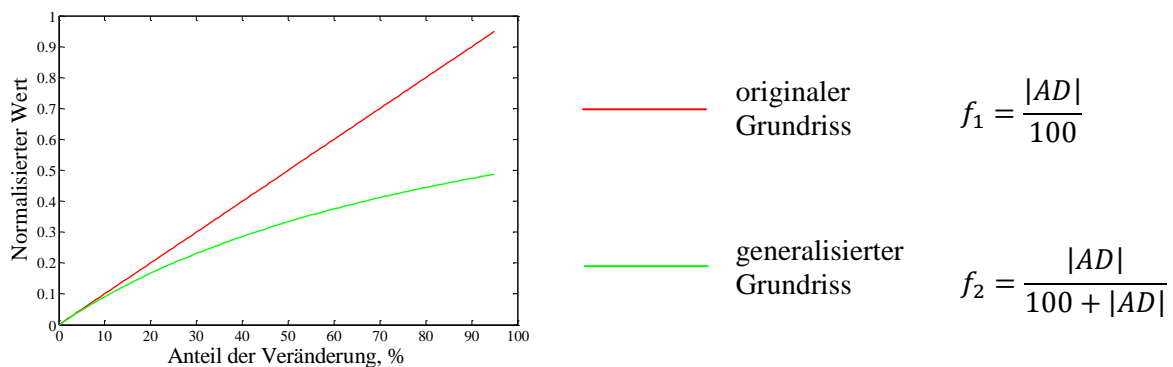


Abbildung 7.4: Die Diskrepanz bei der Normalisierung gleich großer Veränderungen

Abbildung 7.4 illustriert sehr deutlich, dass in dem Fall, wo der generalisierte Grundriss größer wird, die normierten Beträge der Veränderungen positiver geschätzt werden, da sie einen kleineren Anteil an der generalisierten Fläche ausmachen. Ab der Größe, wo die symmetrische Diffe-

renz auf mehr als 20 % der Fläche des originalen Objekts anwächst, wird der Unterschied in der Bewertung bemerkbar. Sie beträgt 5% und wächst mit der Zunahme der Größe der Flächendifferenz immer schneller. Der Erfahrung nach sind solche Veränderungsbeträge nicht selten, wenn die Form eines Objekts ziemlich komplex ist. Dies ist besonders typisch für Landmarken mit vielen architektonischen Elementen, deren Form selbst in kleinen Maßstäben stark vereinfacht abgebildet sein kann.

Aus einem anderen Blickwinkel betrachtet ergibt sich ein weiteres Problem, welches zu Anfang nicht so offensichtlich erscheint, aber dennoch die Gefahr der überschätzten Qualitätsbewertung mit sich bringt. Das Problem besteht darin, dass die Generalisierungsergebnisse mit unterschiedlichem Veränderungsgrad gleich bewertet werden können. Dabei werden größere Veränderungen bei der Normalisierung auf die generalisierte Fläche besser bewertet, als die durch die originale Fläche normalisierten kleineren Veränderungen.

In Abbildung 7.5 a) ist ein Gebäudegrundriss dargestellt, der mit den Generalisierungsalternativen in Abbildung 7.5 b) und c) überlagert ist. Während im ersten Fall der Vorsprung komplett vom generalisierten Grundriss mit eingenommen wird, ist dieser im zweiten Fall vollständig gelöscht, wodurch der Flächeninhalt des originalen Objekts entsprechend vergrößert bzw. verkleinert wird, d.h. $A(G_1) < A(O) < A(G_2)$.

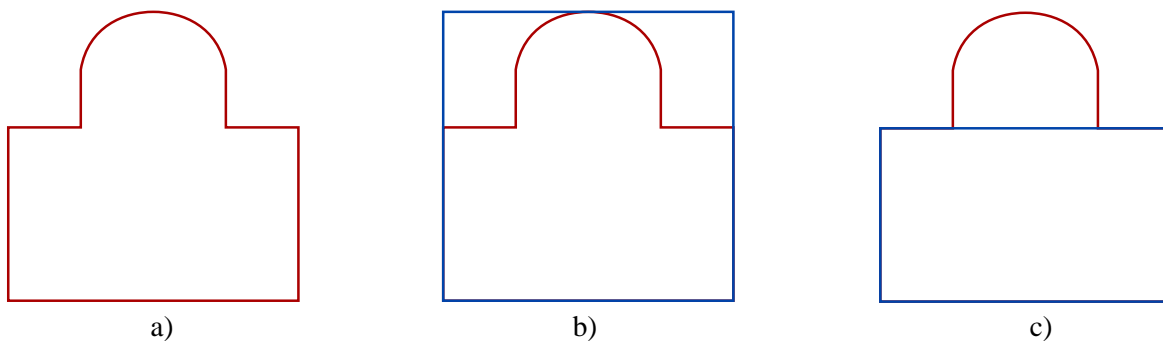


Abbildung 7.5: a) originaler Grundriss, b) und c) Generalisierungsalternativen

Wie bei dem vorherigen Beispiel ist die Diskrepanz bei der Normalisierung der Flächendifferenz auf die Fläche des größten Objekts numerisch unterstützt (siehe Tabelle 7.2)

Nr.	Originale Fläche	Art der Veränderung	Größe der Veränderung	Generalisierte Fläche	Anteil der Veränderung	
					orig. Fläche	max(orig, gen)
Bezugseinheiten						
b)	77,5	Extrusion	22,5	100	29,0 %	22,5 %
c)	77,5	Intrusion	17,5	60	22,6 %	22,6 %

Tabelle 7.2: Gleiche Bewertung von unterschiedlich großen Flächenveränderungen

Die eingeführte Berechnung verdeutlicht, dass bei der Vergrößerung der Objektfläche nach der Generalisierung die Differenz in der Bewertung nach den beiden Methoden 6,5 % beträgt (siehe Ergebnisse in erster Zeile). Zum anderen wird bei der Normierung auf die maximale Fläche der größere Betrag der Extrusion gleich wie der kleinere Betrag der Intrusion bewertet, wobei der Unterschied zwischen den veränderten Teilen in den beiden Fällen 5 % originaler Fläche ausmacht (vgl. erste und zweite Zeile).

Bei komplexeren Grundrissen, wo die Intrusionen und Extrusionen ziemlich gut ausgeglichen werden können, wird die Art der Bewertung keinen großen Unterschied ausmachen. Im Gegen-

satz dazu kann die Ordnung der summierten Veränderungsbeträge deutlich größer sein, was auch zu den drastischen Unterschieden in der Bewertung nach den beiden unterschiedlichen Vorgehensweisen führen wird.

In Abbildung 7.6 a) ist ein Grundriss gezeigt, dessen Konturverlauf Vor- und Einsprünge aufweist. Bei der ersten Generalisierung in Abbildung 7.6 b) ist der Unterschied zwischen der Bewertung der Flächendifferenz kaum auffallend, da die Intrusionen und Extrusionen in etwa ausgeglichen werden, und beträgt etwa 1%. Zugleich ist die Diskrepanz in der Bewertung der gesamten Flächenveränderung gravierender und macht fast 3% aus (siehe Tabelle 7.3 b)).

Die alternative Generalisierung in Abbildung 7.6 c) überdeckt den originalen Grundriss vollständig, wobei die Flächenveränderung ausschließlich durch die Extrusionen charakterisiert wird. In dem Fall ergeben die Flächendifferenz und die symmetrische Differenz die gleichen Beträge (siehe Tabelle 7.3 c)) und die Qualität der Generalisierung wird lediglich anhand dieser einzigen Größe beurteilt. Die räumliche Veränderung des originalen Grundrisses ist in diesem Fall sogar kleiner, dennoch beträgt die Differenz aufgrund von verschiedenen Normierungen über 3%.

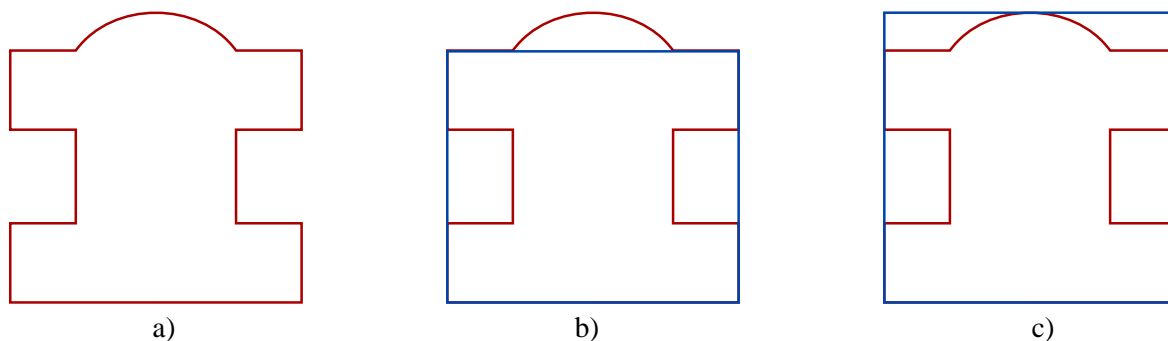


Abbildung 7.6: Alternative Generalisierungen eines komplexen Gebäudegrundriss

Nr.	Originale Fläche	Art der Veränderung	Größe der Veränderung	Generalisierte Fläche	Anteil der Veränderung	
					orig. Fläche	max(orig, gen)
Bezugseinheiten						
b)	80	Extrusion	15,0	90,0	<i>AD</i>	12,5 %
		Intrusion	5,0		<i>SD</i>	25,0 %
c)	80	Extrusion	16,0	96,0		20,0%

Tabelle 7.3: Normierung der Flächendifferenz und symmetrischen Differenz

Empfehlungen zur Normierung von Flächenvergleich

Auf diese Weise haben die eingeführten Beispiele aufgedeckt, welche Schwierigkeiten bei der Normierung der Ähnlichkeitsmaße im Hinblick auf die Objektfläche vorkommen können. Aus diesem Grund wird für die Normierung empfohlen, stets die Fläche des originalen Grundrisses einzusetzen, die eine konstante und von der Generalisierungsalternative unabhängige Größe darstellt und ermöglicht, die unerwünschten Uneindeutigkeiten in der Qualitätsbewertung zu vermeiden.

8 Umsetzung der entwickelten Qualitätscharakteristiken

Die Aussagekraft der kontur- und flächenbezogenen Charakteristiken, die in den vorherigen zwei Kapiteln eingeführt wurden, sollen an dieser Stelle für die Evaluierung der generalisierten Gebäudegrundrisse auf der Mikro- und Makroebene diskutiert werden. Auf der Mikroebene wird zuerst die gesamtheitliche Qualitätsbewertung am Beispiel eines einzelnen Objekts durchgeführt, wobei die Bedeutung jeder Charakteristik sowie deren graphische Darstellung gegeben sind. Dem Vergleich der alternativen Generalisierungslösungen eines Objekts widmet sich der zweite Abschnitt dieses Kapitels. Es wird eine Möglichkeit zur Aggregation aller Charakteristiken aufgezeigt, welche die Gesamtqualität einer Generalisierungslösung durch ein einziges Maß zum Ausdruck bringt.

Auf Makroebene wird die Generalisierung der einzelnen Gebäudegrundrisse innerhalb eines Datensatzes evaluiert. Bei der Analyse einer großen Datenmenge spielt insbesondere die Anschaulichkeit der Ergebnisse eine große Rolle. Die Wahl der Darstellungsparameter für die Qualität der Generalisierung, welche eine gute Diskriminierung der Ergebnisse ermöglicht, wird im dritten Abschnitt ausführlich erläutert. Letztendlich werden die alternativen Generalisierungen eines Datensatzes miteinander verglichen. Deren relative Betrachtung erlaubt, Rückschlüsse über die Eigenschaften des Generalisierungsvorganges zu ziehen.

8.1. Evaluation auf der Mikroebene

Die Evaluierung der Generalisierung auf Mikroebene impliziert die Betrachtung der einzelnen Objekte, wobei einem Original eine generalisierte Version entspricht. Die oben vorgeschlagenen Qualitätscharakteristiken werden hier am Beispiel von 3D-Gebäudemodellen getestet, die durch das Stadtmessungsamt Stuttgart zur Verfügung gestellt wurden. Die Erzeugung des 3D-Stadtmodells von Stuttgart ist in (Bauer and Mohl, 2005) detailliert beschrieben. Zunächst wird die Simplifizierung dieser Gebäudemodelle anhand des in (Kada, 2007) beschriebenen Ansatzes zur 3D-Generalisierung durchgeführt, jedoch werden im Rahmen dieser Arbeit lediglich die 2D-Grundrisse der resultierenden Gebäudemodelle betrachtet. Im Fokus dieses Verfahrens stehen in erster Linie die Erzeugung einer vereinfachten Topologie und die Anpassung der Geometrie im 3D-Raum, was nicht unbedingt grundrisstreue Modelle liefert. Um die alternativen Generalisierungen zu generieren, werden die generalisierten Grundrisse an die Fassadenlinien der originalen Polygone nach dem in (Peter et al., 2008) beschriebenen Algorithmus angepasst. Auf diese Weise werden bei den generalisierten und angepassten Grundrissen unterschiedliche geometrische Eigenschaften priorisiert, was ein gutes Beispiel für die Untersuchung darstellt. Im Folgenden dienen die ursprünglich vorgegebenen Grundrisse bzw. Originale als Referenzobjekte, mit denen die Form der generalisierten und angepassten Grundrisse verglichen wird.

8.1.1. Evaluierung eines generalisierten Objekts

Die Beschreibung der Veränderungen eines Grundrisses infolge der Generalisierung erfolgt insgesamt nach vier Charakteristiken, wobei sowohl die Kontur des Objekts als auch dessen Fläche in Betracht gezogen wird. Die Konturtreue des generalisierten Grundrisses in Bezug auf dessen Original wird aufgrund der maximalen Abweichung zwischen den Konturen und des Anteils der Konturüberlappung geschätzt. Zur Bewertung der Flächentreue wird die symmetrische Differenz und die Flächendifferenz eingesetzt. Die Verwendung dieser Charakteristiken und die erzielten Ergebnisse werden im Folgenden an einem Beispiel diskutiert.

Als Erstes wird der Konturverlauf des originalen und generalisierten Grundrisses aufgrund der maximalen Abweichung verglichen, die in Abbildung 8.1 a) als gestrichelte Linie gezeigt wird. Der Wert dieser Charakteristik resultiert aus (6.12) als der Höchstbetrag aus allen maximal kürzesten Wegen innerhalb eines jeden gelöschten Elements. Dabei kann für die Beschleunigung der Berechnung die modifizierte Hausdorff-Distanz nach (6.7) für die gelöschten konkaven Elemente verwendet werden, da diese in dem Fall das gleiche Ergebnis wie der maximale kürzeste Weg liefert. Darüber hinaus kann für die gelöschten konvexen Elemente deren Komplexität nach (6.13) charakterisiert werden.

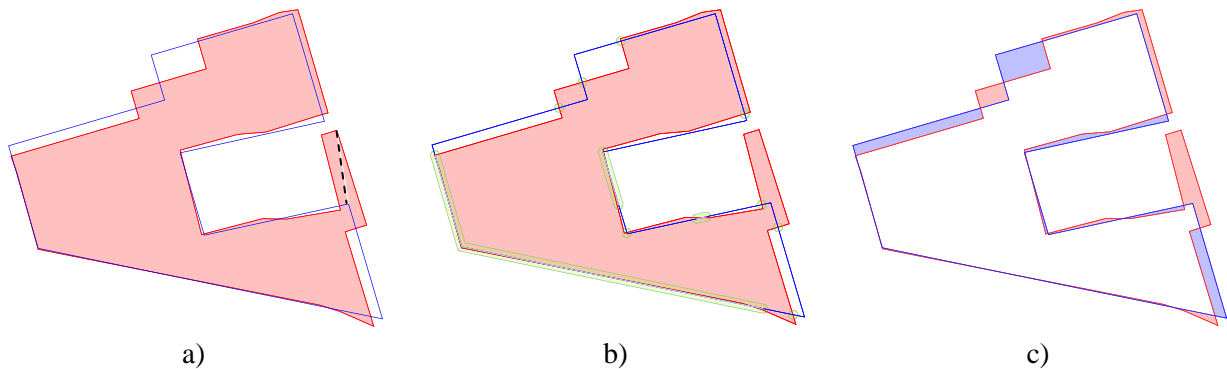


Abbildung 8.1: Evaluierung eines generalisierten Gebäudegrundrisses: a) maximale Abweichung zwischen den Objektkonturen, b) Konturüberlappung und c) symmetrische Differenz (Intrusionen – rot, Extrusionen – blau)

Die maximale Abweichung zwischen der originalen und generalisierten Kontur wird mit dem Betrag der Minimaldistanz der Generalisierung verglichen, welche hier den Detaillierungsgrad eines Objekts als dessen minimale sichtbare Kante festlegt und nicht überschritten werden darf. Aus diesem Grund ist die Korrektheit der Identifizierung der maximalen Abweichung zwischen den betrachteten Konturen sehr wichtig. In Abbildung 8.2 ist der als a) Vertex-Hausdorff-Distanz und als b) MSP berechnete maximale Abstand zwischen dem originalen und generalisierten Grundriss dargestellt, wobei die Minimaldistanz der Generalisierung 2,5 m beträgt. Im ersten Fall liegt der Abstandsbetrag im Rahmen der Minimaldistanz der Generalisierung, wird jedoch an einer falschen Stelle identifiziert, was zu keinem intuitiven Ergebnis führt und somit für einen menschlichen Betrachter unverständlich erscheinen kann. Anstatt die Zuordnung der Objektteile auf den kürzesten Abständen zurückzuführen, erfolgt diese im zweiten Fall durch Betrachtung der maximalen Abweichung innerhalb der gelöschten Elemente und ermöglicht damit dieses Problem zu lösen. Somit weist die maximale Abweichung zwischen diesen zwei Konturen auf einen eliminierten Vorsprung hin, wobei der Betrag der Minimaldistanz der Generalisierung fast um den zweifachen Wert überschritten wird. Dies spricht für die Wichtigkeit dieses gelöschten Elements für den originalen Grundriss, das durch die Generalisierung eher eine Betonung erhalten sollte.

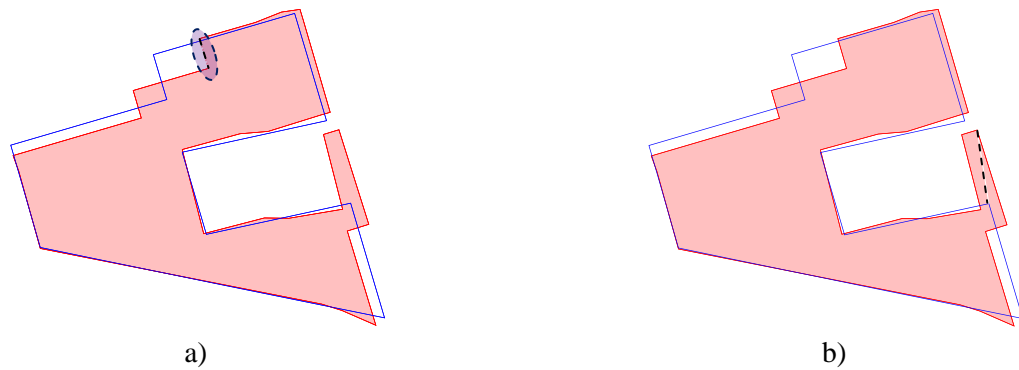


Abbildung 8.2: Maximale Abweichung zwischen zwei Konturen als a) Vertex-Hausdorff-Distanz und b) modifizierte Hausdorff-Distanz

Die zweite Charakteristik für die Bewertung der Konturtreue zwischen dem originalen und generalisierten Grundriss ist die Konturüberlappung, die den nach der Generalisierung erhalten gebliebenen Anteil der originalen Kontur widerspiegelt. Diese ist in Abbildung 8.1 b) dargestellt, wobei die überlappenden Segmente beider Konturen der Anschaulichkeit halber durch den grün und größtmäßig betont visualisierten Puffer markiert sind. Der Anteil der Konturüberlappung wird nach (6.18) berechnet und ist von der gewählten Breite des Puffers abhängig. Die Pufferbreite ist aus der Überlegung heraus begründet, dass die Gebäudegrundrisse, die keine topologische Simplifizierung, sondern nur eine geometrische Nachbesserung benötigen, eine komplette Überlappung des originalen und generalisierten Grundriss aufweisen müssen. Dazu gehören hauptsächlich die zwei Fälle, wenn ein Gebäudegrundriss infolge der Generalisierung lediglich zur Gewährleistung der Kollinearität und Rechtwinkligkeit angepasst wird oder wenn dessen annähernd kollineare Segmente durch eine Kante ersetzt werden. Unter topologischer Simplifizierung ist dabei die Eliminierung eines architektonischen Elements gemeint. Aus diesem Grund muss der Betrag der Pufferbreite groß genug sein, um die Auswirkungen der geometrischen Ungenauigkeiten der Objektmodellierung auszugleichen und gleichzeitig die Erkennung der kleinsten vorkommenden architektonischen Elemente zu garantieren. Als Beispiel werden die resultierenden Konturüberlappungen mit verschiedenen Pufferbreiten in Abbildung 8.3 gezeigt. Darauf basierend beträgt die gewählte Pufferbreite 0.15 m, was die Erfüllung der festgelegten Bedingungen erlaubt.

Letztendlich wird die Flächentreue des generalisierten Grundrisses und dessen Original wie in (7.5) und (7.9) aufgrund der symmetrischen Differenz und Flächendifferenz geschätzt. Diese Charakteristiken werden als die Summe und Differenz von Intrusionen und Extrusionen berechnet. Die Bestandteile der Flächenveränderung eines Objekts sind in Abbildung 8.1 c) dargestellt.

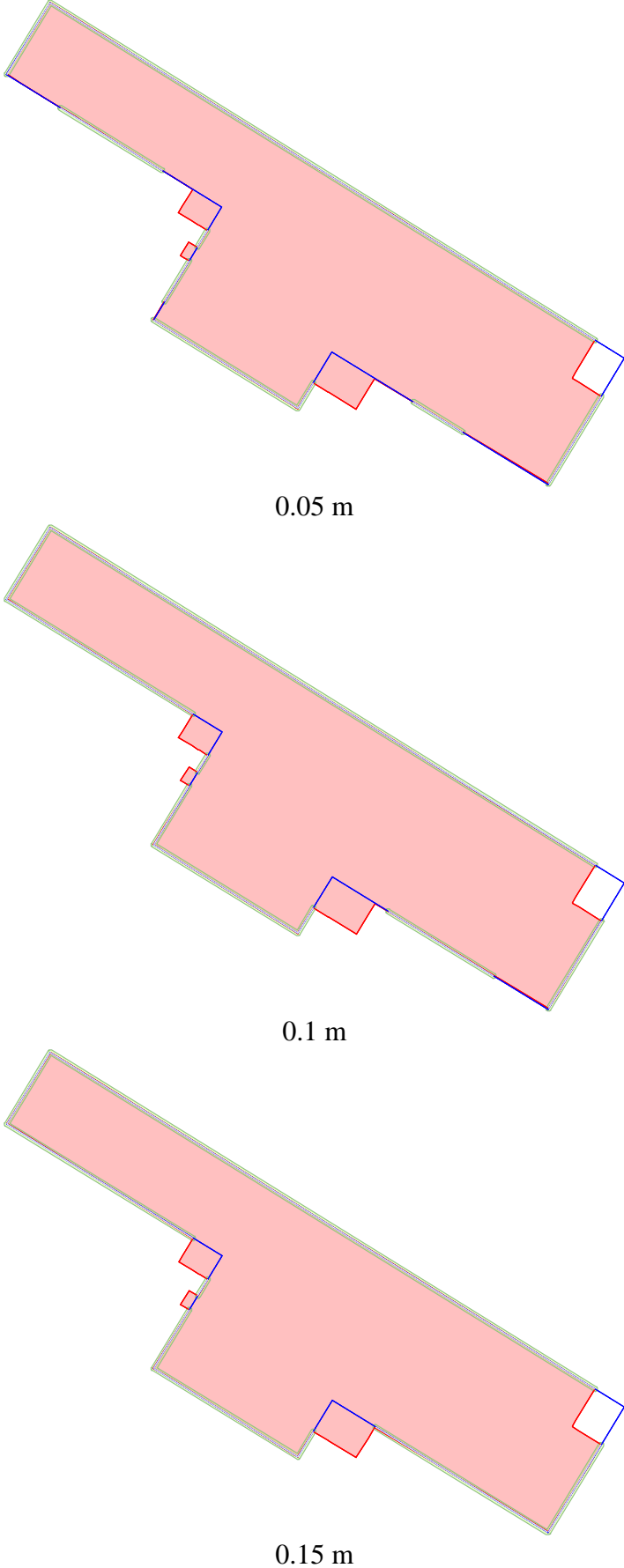


Abbildung 8.3: Konturüberlappung zwischen dem originalen und generalisierten Grundriss

8.1.2. Vergleich alternativer Generalisierungen eines Objekts

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Qualitätscharakteristiken für die Evaluierung der generalisierten Gebäudegrundrisse, welche im vorherigen Abschnitt zusammengefasst sind, können demnach auch für den Vergleich von alternativen Generalisierungslösungen eines Objekts eingesetzt werden. Dies wird am Beispiel dreier Gebäudegrundrisse von Landmarken des Stuttgarter Stadtmodells gezeigt: dem Hindenburgbau, dem Neuen Schloss und Stuttgarter Opernhaus. Alle drei Objekte verfügen über eine große Grundfläche und weisen einen komplexen Umrissverlauf auf. Im Folgenden werden die generalisierten und angepassten Grundrisse mit deren Originalen verglichen, um dann die beste Übereinstimmung zu identifizieren. Zu diesem Zweck werden die originalen Konturen wie in Abbildungen 7.4-7.6 mit dem generalisierten (oben) und angepassten (unten) Grundriss überlappt und entsprechend dargestellt. Dabei werden alle oben beschriebenen Charakteristiken für jedes Grundrisspaar zusammen dargestellt. Diese sind maximale Abweichung der Konturen (als gestrichelte Linie, die mit einer Ellipse markiert ist), Konturüberlappung (grüne Kontursegmente), Intrusionen (rote Flächen) und Extrusionen (blaue Flächen), während die entsprechenden Maße dieser Charakteristiken jeweils in einer Tabelle unter dem Beispiel gegeben sind (siehe Tabelle 7.1-7.3). Hier werden originale und generalisierte Grundrisse als O und G bezeichnet, OI steht für die Konturüberlappung (engl. „outline intersection“) und A_{intr}/A_{extr} für den Betrag der Intrusions- und Extrusionsflächen. Basierend auf empirischen Untersuchungen beträgt die gewählte Breite des Toleranzpuffers 0.15 m, was etwas höher ist als die in (Wolf, 1999) angegebene Genauigkeit bei der Datenerfassung. Diese variiert zwischen 8 und 10 cm im Plan.

Da die vorgeschlagenen Charakteristiken unterschiedliche Qualitätsaspekte der Generalisierung in Betracht ziehen, ist es wichtig, deren ganzheitliche Berücksichtigung bzw. Aggregation zu ermöglichen. Die einzige Schwierigkeit besteht darin, dass außer dem nach (6.18) berechneten Anteil der Konturüberlappung alle übrigen Charakteristiken als Distanzen berechnet werden und zunächst in Ähnlichkeitsmaße umgewandelt werden müssen. Zu diesem Zweck kann die nach der Generalisierung unveränderte Fläche des Objekts gemäß (7.1) zu der gesamten Fläche des originalen und generalisierten Grundrisses verglichen werden. Auf diese Weise gilt, je größer die Übereinstimmung zwischen der Schnittfläche und der Fläche des Originals ist, desto kleinere Beträge weisen die Intrusionsflächen auf. Das gleiche gilt für die Extrusionen, wenn die Schnittfläche zur Fläche des generalisierten Grundrisses verglichen wird. Die hundertprozentige Übereinstimmung der Schnittfläche mit dem originalen oder generalisierten Objekt spricht für die komplette Abwesenheit der Intrusionen oder Extrusionen. Aus diesem Grund haben die Charakteristiken in (8.1) und (8.2), die als Verhältnis von der Schnittfläche des originalen und generalisierten Grundrisses zu deren kompletten Flächen berechnet werden, jeweils die Bezeichnung Anteil von Intrusionen oder Extrusionen (engl. „rate of intrusion/extrusion“) erhalten.

$$R_{intrusion} = \frac{Area(O \cap G)}{Area(O)} \quad (8.1)$$

$$R_{extrusion} = \frac{Area(O \cap G)}{Area(G)} \quad (8.2)$$

Somit stellen die Charakteristiken, der Anteil der Konturüberlappung, sowie der Anteil der Intrusionen und Extrusionen, die Qualitätsmaße dar, deren bester Wert 1 bei der vollständigen Übereinstimmung zwischen originalen und generalisierten Grundriss erreicht wird. Und je kleiner die Größe dieser Koeffizienten ist, desto weniger Ähnlichkeit weisen die betrachteten Objekte auf.

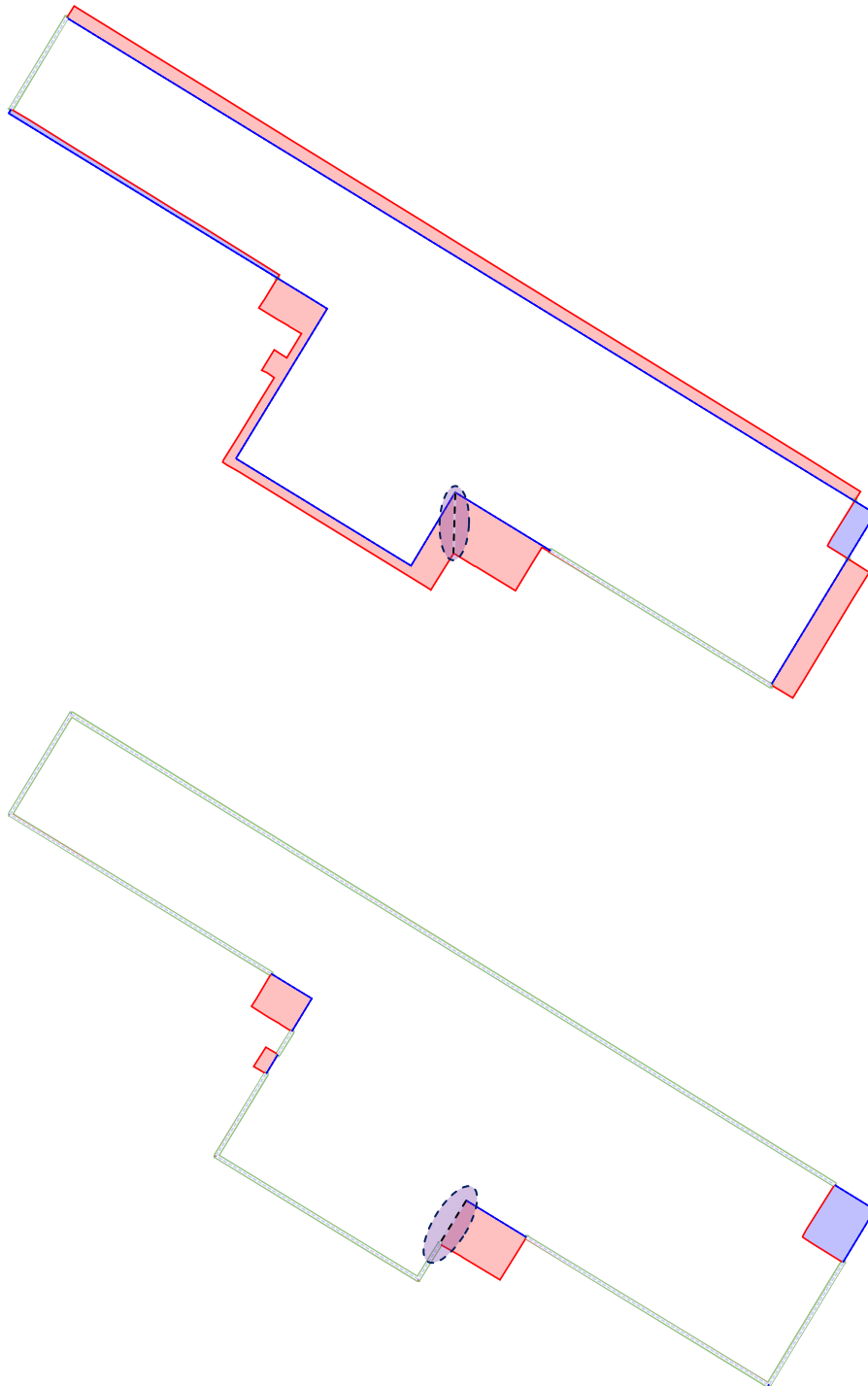


Abbildung 8.4: Hindenburgbau

Gen. Ansatz	Mindestgröße	Maximalabstand	Umfang	OI	Fläche		A_{intr}	A_{extr}
					O	G		
m					m ²			
Kada 2007	10	8,52	365,40	51,53	3975,09	3481,08	550,99	56,98
Peter 2008		7,36		311,57		3919,16	123,17	67,24

Tabelle 8.1: Auswertung für den Hindenburgbau

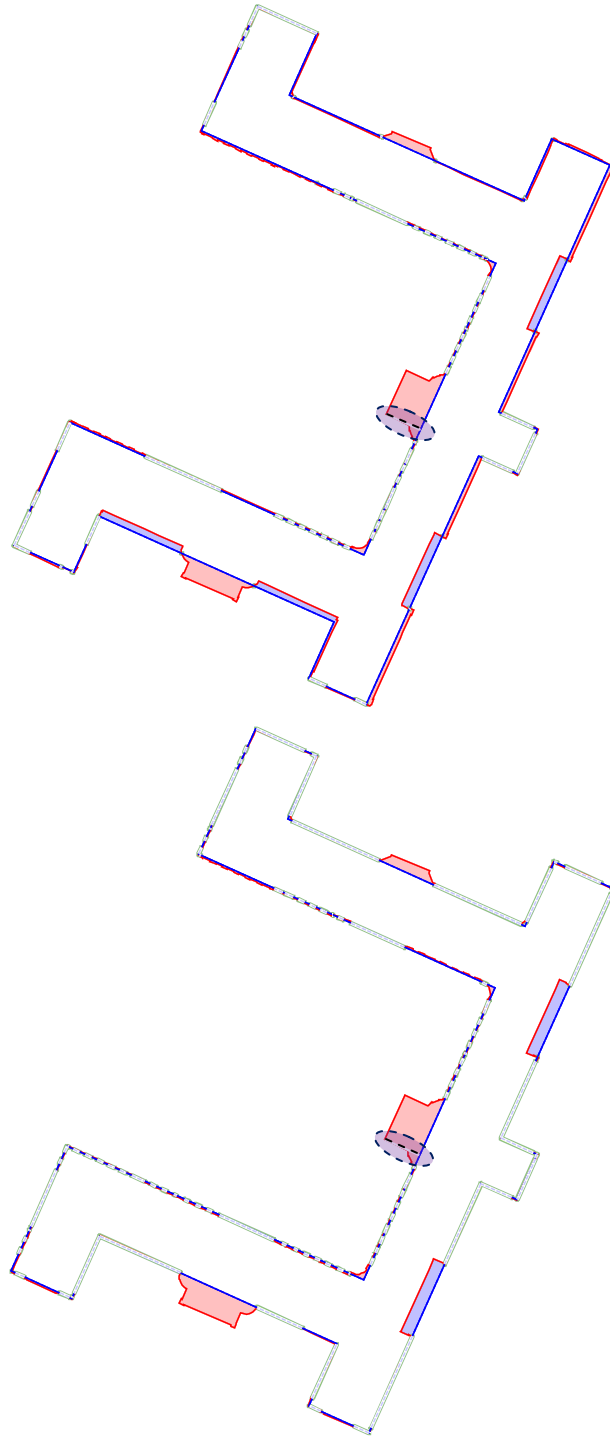


Abbildung 8.5: Neues Schloss

Gen. Ansatz	Mindestgröße	Maximalabstand	Umfang	OI	Fläche		A_{intr}	A_{extr}
					O	G		
m					m ²			
Kada 2007	10	10,65	918,84	218,95	7676,60	7421,71	497,44	242,55
Peter 2008		10,65		503,02		7478,98	392,19	194,57

Tabelle 8.2: Auswertung für das Neue Schloss

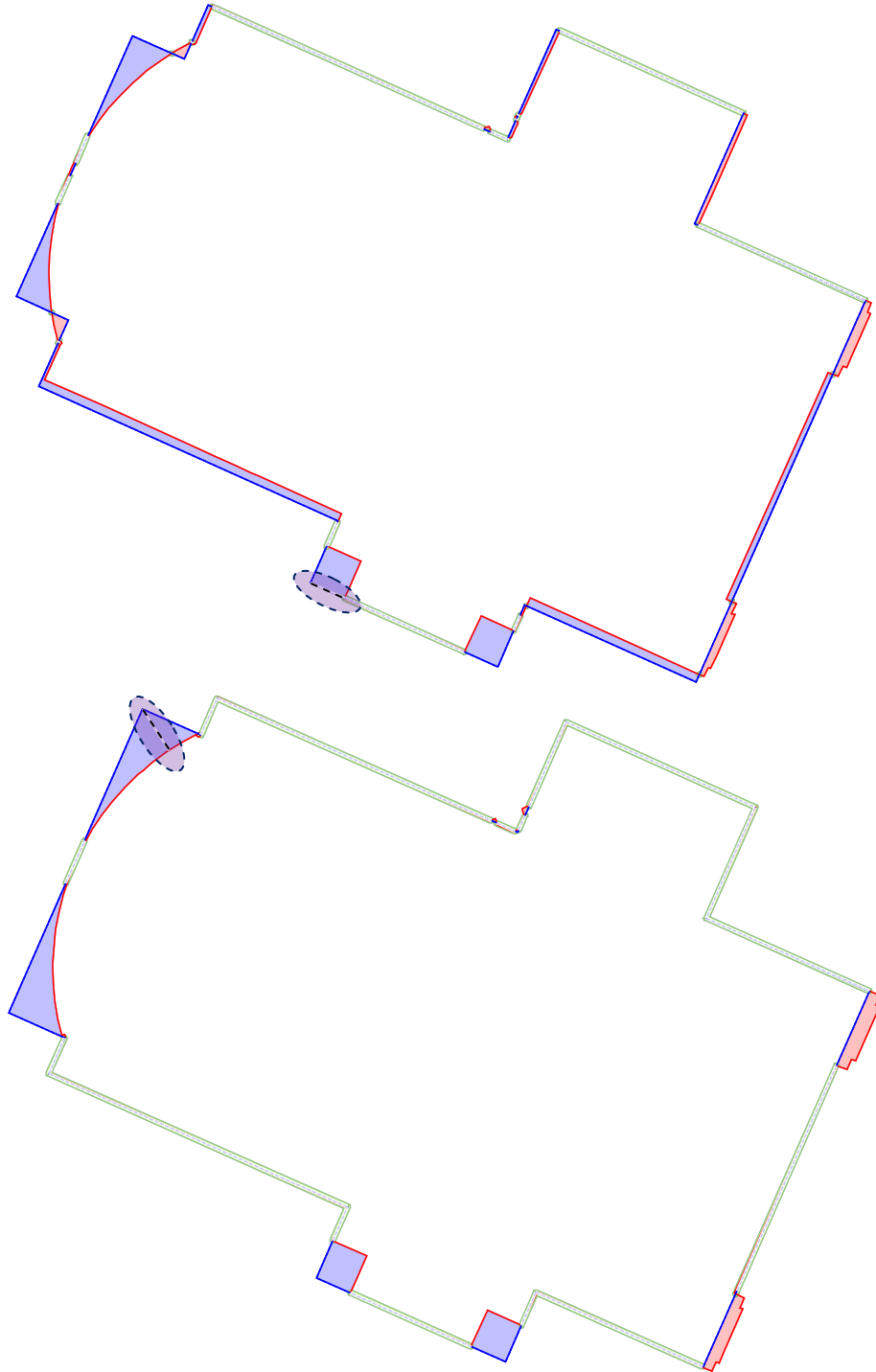


Abbildung 8.6: Oper

Gen. Ansatz	Mindestgröße	Maximalabstand	Umfang	OI	Fläche		A_{intr}	A_{extr}
					O	G		
m					m ²			
Kada 2007	5	4,32	314,08	107,85	4549,75	4691,08	31,24	172,57
Peter 2008		7,36		230,63		4644,69	31,45	126,39

Tabelle 8.3: Auswertung für die Oper

Die letzte Charakteristik, die für den Vergleich des originalen und generalisierten Grundrisses verwendet wird und als Gegenstück zur Flächendifferenz aus (7.9) dient, ist das Flächenverhältnis (engl. „area ratio“). Dieses Ähnlichkeitsmaß wird als das Verhältnis zwischen der Fläche des generalisierten Objekts zu dessen Original berechnet und gleicht dem Wert 1, wenn sich der Flächenbetrag des Grundrisses nach der Generalisierung nicht verändert hat. D.h. wenn das Objekt entweder gleich geblieben ist oder die Intrusions- und Extrusionsflächen sich gegenseitig ausgleichen. Dennoch wird in dem Fall, wenn die Fläche des Objekts nach der Generalisierung vergrößert wird, der Betrag 1 überschritten. Die Gleichungen (8.3) erlauben, diese Unannehmlichkeit zu beseitigen, um das Flächenverhältnis gemeinsam mit den anderen Charakteristiken betrachten zu können.

$$R_{area} = \begin{cases} \frac{Area(G)}{Area(O)} & \text{if } Area(G) \leq Area(O) \\ \frac{2 * Area(O) - Area(G)}{Area(O)} = 2 - \frac{Area(G)}{Area(O)} & \text{if } Area(G) > Area(O) \end{cases} \quad (8.3)$$

Somit spiegeln die vier beschriebenen Charakteristiken: der Anteil der Konturüberlappung, die Anteile von Intrusionen und Extrusionen, sowie das Flächenverhältnis (siehe (6.18) und (8.1)-(8.3)) die Übereinstimmung zwischen dem originalen und generalisierten Grundriss wider und werden als Qualitätsparameter der Generalisierung QP bezeichnet. Letztendlich werden diese im Rahmen einer einzigen Charakteristik „Gesamtqualität der Generalisierung“ TQ (engl. „total quality“) nach der euklidischen Distanz, wie in (8.4), aggregiert. Diese Distanzfunktion ermöglicht es, die Werte der Qualitätsparameter, welche sich von 1 deutlich unterscheiden, besser zu deskriminieren. Was die maximale Abweichung zwischen den Konturen angeht, stellt diese Charakteristik die primäre Prüfung des generalisierten Grundrisses auf Korrektheit dar; sie wird getrennt von den anderen Charakteristiken betrachtet und mit der Minimaldistanz der Generalisierung verglichen.

$$TQ = \sqrt{\sum_{i=1}^n QP_i^2} \quad (8.4)$$

Sämtliche Ergebnisse der Qualitätsbewertung von Generalisierungslösungen für alle drei Beispiele sind in Tabelle 8.4 zusammengefasst. Hier sind sowohl die Ausgangsmaße, als auch die berechneten Qualitätsparameter, welche für die bessere Anschaulichkeit mit Grün in der Tabelle markiert sind, und die aggregierten Beträge der Gesamtqualität gegeben. Da der höchst mögliche Betrag jedes der vier Qualitätsparameter gleich 1 ist, beträgt die Gesamtqualität im Fall der kompletten Übereinstimmung des originalen und generalisierten Grundrisses den Wert 2 (siehe Tabelle 8.4, vorletzte Spalte). Zur Erleichterung des Verständnisses der aggregierten Charakteristiken sowie zur besseren Diskriminierung der endgültigen Ergebnisse der Generalisierungsbewertung werden die Werte auf den Bereich $[0,100]$ normiert (vgl. Tabelle 8.4, letzte Spalte).

Beim Vergleich der maximalen Abweichungen zwischen den generalisierten Grundrissen und deren Originalen mit der Minimaldistanz der Generalisierung sind drei verschiedene Situationen aufgetreten. Auf diese Weise wird die maximale Abweichung für den Hindenburgbau nach der Anpassung des generalisierten Grundrisses an die originale Kontur verbessert, ist für das Neue Schloss gleich geblieben und für die Oper sogar größer geworden. In den letzten zwei Beispielen wird der Generalisierungswert sogar etwas überschritten. Somit fehlt dem generalisierten Grundriss des Neuen Schlosses der Zentraleingang (Vorbau), welcher wahrscheinlich geringfügig unter

dem Betrag der Mindestgröße der Generalisierung liegt. Aufgrund dessen semantischer Bedeutung sollte man in diesem Fall eine geometrische Betonung in Betracht ziehen. Da der Ansatz zur Konturanpassung keine topologischen Veränderungen des generalisierten Grundrisses impliziert, ist die maximale Abweichung zwischen den Objekten nach der Anpassung gleich geblieben. Bei der Oper jedoch hat die Anpassung der generalisierten Kontur dazu geführt, dass die maximale Abweichung den Schwellwert überschreitet. Dies spricht dafür, dass bei der Anpassung gekrümmter Gebäudeteile zu rechteckigen Strukturen die Ansätze zum Flächenausgleich bessere Ergebnisse liefern und solche Fälle abgedeckt von der Anpassung in Bezug zu den restlichen Konturteilen betrachtet werden sollten.

Grundriss	Generalisierungsansatz	Mindestgröße	MD	Umfang	OI	Fläche		Schnittfläche		R_{area}	TQ	TQ (normliert) 0..100
						O	G	R_{intr}	R_{extr}			
M						m ²						
Hindenburgbau	Kada 2007	10	8,52	365,40	51,53 0,14	3975,09	3481,08	3424,10 0,86 0,98		0,88	1,58	79,0
	Peter 2008		7,36		311,57 0,85		3919,16	3851,92 0,97 0,98				
Neues Schloss	Kada 2007	10	10,65	918,84	218,95 0,24	7676,60	7421,71	7179,16 0,93 0,97		0,96	1,67	83,7
	Peter 2008		10,65		503,02 0,55		7478,98	7284,41 0,95 0,97				
Oper	Kada 2007	5	4,32	314,08	107,85 0,34	4549,75	4691,08	4518,51 0,99 0,96		0,97	1,72	86,2
	Peter 2008		5,59		230,63 0,73		4644,69	4518,30 0,99 0,97				

Tabelle 8.4: Zusammengefasste Ergebnisse der Qualitätsbewertung

Infolge der Anpassung wird die Konturüberlappung in allen Fällen drastisch verbessert, was die Zweckmäßigkeit des Ansatzes für die Konturanpassung bewahrheitet. Auch die Flächenübereinstimmung weist praktisch in allen Fällen bessere Ergebnisse auf, insbesondere für den Hindenburgbau, wo der Betrag der Intrusionsflächen nach der Generalisierung sehr hoch war.

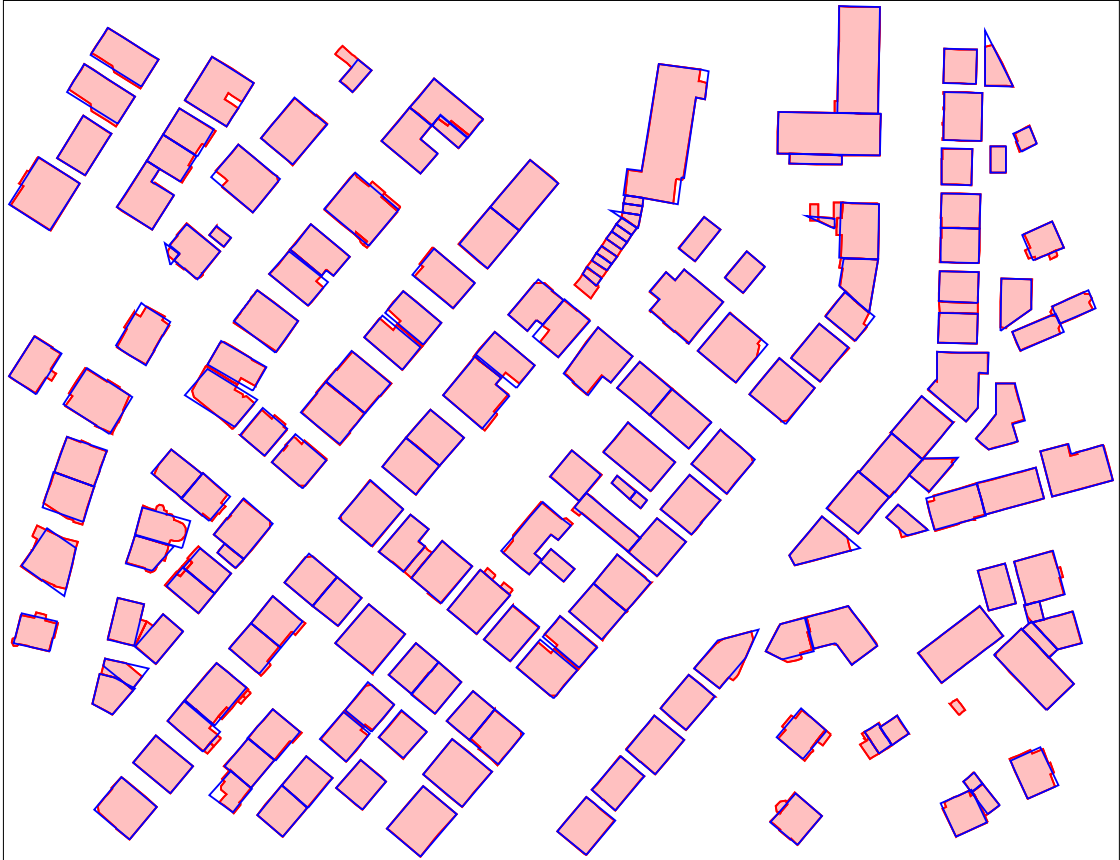
Die Gesamtqualität der Generalisierung wird für alle drei Beispiele nach der Anpassung besser, wobei das beste Ergebnis für den Hindenburgbau erreicht wird. Am schlechtesten konnte das Neue Schloss angepasst werden, was durch die Komplexität dessen Konturverlaufs und die Vielzahl an kleinen architektonischen Elementen erklärt werden kann.

8.2. Evaluation auf der Makroebene

Basiert auf der Evaluierung einzelner Objekte kann die Qualitätsbewertung der Generalisierung für einen ganzen Datensatz durchgeführt werden. Dabei werden sämtliche Veränderungen infolge der Generalisierung innerhalb eines Datensatzes statistisch charakterisiert, was der Evaluierung auf der Makroebene entspricht. Als Beispiel wird im Folgenden die Qualitätsbewertung des aus 196 Gebäuden bestehenden Wohngebiets durchgeführt. In Analogie zur Evaluierung auf der Mikroebene wird zunächst die Qualitätsbewertung eines generalisierten Datensatzes diskutiert. Anschließend wird der Vergleich zweier alternativer Generalisierungen eines Datensatzes dargestellt. Dabei werden die gleichen Ansätze wie in den vorherigen zwei Abschnitten eingesetzt, bei

dem der Datensatz zuerst generalisiert und darauffolgend an die Konturen der originalen Grundrisse angepasst wird. Hier ist es wichtig anzumerken, dass die Gebäudegrundrisse lediglich einzeln ohne Nachbarschaftsbeziehungen und räumliche Zusammenhänge, wie z.B. Muster oder Orientierung, betrachtet werden. Die beiden Datensätze, der generalisierte und der angepasste, sind in Abbildung 8.7 dargestellt, wobei die originalen Grundrisse rot gefüllt sind.

Das Ziel der Qualitätsbewertung beschränkt sich jedoch nicht nur auf die Abschätzung der geometrischen Abweichungen zwischen den Ausgangsdaten und den generalisierten Daten. Der wesentliche Bestandteil der Qualitätsanalyse, besonders wenn es sich um große Datenmengen handelt, besteht auch in der anschaulichen Darstellung der gewonnenen Ergebnisse. Daher steht auch dieses Thema im Fokus der angeführten Makroevaluierung. Da der in dieser Arbeit vorgeschlagene Ansatz für die Qualitätsbewertung der Generalisierungswirkungen auf die ursprünglichen Objekte sich keiner konkreten Anwendung widmet, spielt die Anschaulichkeit und gute Diskriminierung der Analyseergebnisse bei der Aufstellung der Qualitätsklassen eine zentrale Rolle. Dabei werden auch die geometrische Bedeutung und die statistische Verteilung jeder Charakteristik mit berücksichtigt.



a)



b)

Abbildung 8.7: a) generalisierter Datensatz, b) angepasst an den Grundriss

8.2.1. Evaluierung eines generalisierten Datensatzes

Allgemein gesehen ist die Form der Gebäudegrundrisse des betrachteten Datensatzes in Abbildung 8.7 (rot) nicht so komplex, wie die von den im Abschnitt 8.1.2 dargestellten Landmarken (vgl. Abbildung 8.4-8.6). Somit wird hier eher die typische Bebauung eines Wohngebiets gezeigt, für deren Bewertung die Eignung der vorgeschlagenen Qualitätscharakteristiken geprüft werden soll. Es ist Abbildung 8.7 zu entnehmen, dass einige Grundrisse durch die Generalisierung aufgrund ihrer geringen Größe komplett eliminiert werden. Diese Gebäude werden während der Analyse nicht in Betracht gezogen. Sämtliche Bewertungsergebnisse der generalisierten und angepassten Grundrisse sind relativ zum originalen Datensatz normiert und in einer Aufstellung mit den jeweiligen Kennnummern jedes Objekts in Anhang D, E und F angeführt.

Für die Darstellung der Unterschiede in der Datenqualität können verschiedenen Visualisierungstechniken eingesetzt werden: mehrere Nuancen von Intensität und Sättigung einer Farbe oder unterschiedliche Farben und Texturen (Bard, 2004; Devillers et al., 2005). Bei der Verwendung verschiedener Farben können unterschiedliche Qualitätsstufen insbesondere anhand von einer diskreten Klassifizierung oder einer Übergangsskala dargestellt werden. Dabei ist die Auswahl des Farbmodells vom Zweck der Visualisierung abhängig. Demnach ist die Verwendung von Übergangsfarben in dem Fall angemessen, wenn die berechneten Werte der Qualitätscharakteristiken objektiv dargestellt werden sollen. Im Unterschied dazu erfolgt eine diskrete Einfärbung nach vorgegebenen Schwellwerten und bietet eine weitere Interpretation der Qualitätskenngrößen an. Eine solche Darstellung ist eher anwendungsorientiert, da die Klassengrenzen sich für jeden konkreten Datensatz stark unterscheiden können. Die häufigste Repräsentation von Qualitätsklassen ist das sogenannte Ampelmodell, bei der die grüne, gelbe oder rote Farbe die Daten qualitative als „gut“, „befriedigend“ oder „schlecht“ darstellt. Im Weiteren wird die Angemessenheit der beiden Farbmodellen für die Visualisierung jeder der betrachteten Qualitätscharakteristik erläutert.

Maximale Konturabweichung

Die qualitative Einstufung der maximalen Konturabweichungen zwischen den originalen und generalisierten Grundrissen erfolgt aufgrund der Mindestgröße der Generalisierung, welche für diesen Datensatz 2,5 m beträgt. Als korrekt generalisiert können diejenigen Grundrisse betrachtet werden, deren maximale Abweichung den Wert der Mindestgröße nicht überschreiten. Die Generalisierungslösungen, deren Maximalabweichungen etwas über die Mindestgröße hinausgehen, können befriedigend sein, wenn diese lediglich eine geometrische Nachbesserung benötigen. Hier kann jedoch keine Unterscheidung zu den Fällen getroffen werden, bei denen auch die topologische Veränderung eines generalisierten Grundrisses für die Verbesserung der Ergebnisse notwendig ist (siehe Abschnitt 6.1). Somit werden in die zweite Klasse Generalisierungslösungen eingestuft, deren Lösungen im Wertebereich zwischen der Mindestgröße und doppelten Mindestgröße liegen. Jedoch müssen diese Grundrisse in jedem Einzelfall hinsichtlich der Verbesserung betrachtet werden. Letztendlich werden alle Generalisierungen mit einer Maximalabweichung größer als die doppelte Mindestgröße als unkorrekt angesehen. Hier wurde im Bezug zur Minimaldistanz zu stark generalisiert.

Dementsprechend werden in Abbildung 8.8 a) drei Qualitätsklassen dargestellt, die beim Ampelmodell mit Grün, Gelb und Rot gekennzeichnet sind. In Abbildung 8.8 b) sind die Schwellwerte dieselben, wobei die Farbübergänge proportional zur Größe der Maximalabweichung berechnet sind.

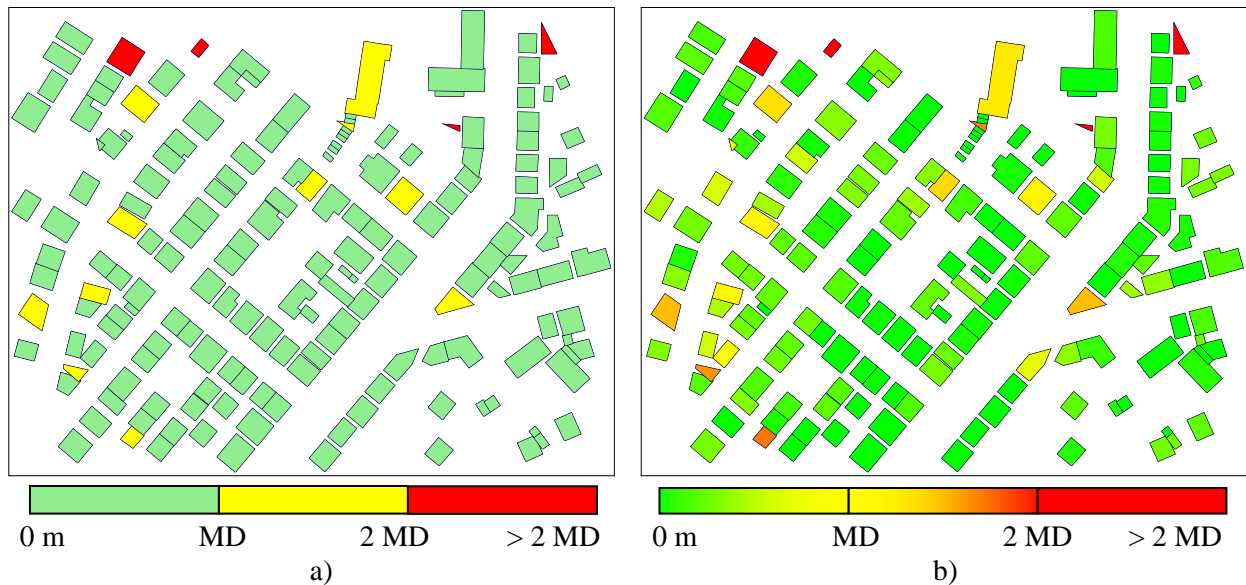


Abbildung 8.8: Farbskala für die Klassifikation von Hausdorff-Distanzen

Insbesondere beim Ampelmodell von Abbildung 8.8 (links) ist deutlich erkennbar, dass die Generalisierung insgesamt korrekt durchgeführt wurde und die Werte der Hausdorff-Distanz mit Ausnahme weniger Objekte innerhalb der zulässigen Grenzen liegen. Das häufigste Problem ist bei der Generalisierung von nicht rechtwinkligen Strukturen aufgetreten, wie z.B. bei den Grundrissen 83, 169, 170, 195, (siehe Anhang D). Dabei werden zwei gegenüberliegende und nicht parallele Kanten eines Grundrisses bis zu deren Schnittpunkt verlängert, wodurch eine kurze Kante dazwischen eliminiert wird. Ein anderer typischer Fall tritt auf, wenn ein langer, jedoch schmaler Vor- oder Einsprung aufgrund zu kleiner Breite komplett eliminiert wird, wie es bei den Grundrissen 190 und 193 der Fall ist. Das Ergebnis kann durch die Betonung anstatt der Simplifizierung verbessert werden.

Auf diese Weise hat die Charakteristik der maximalen Konturabweichung es ermöglicht, die fehlerhaften Generalisierungslösungen schnell zu identifizieren. Bei deren näheren Betrachtung konnten die typischen Schwächen des Generalisierungsansatzes aufgedeckt werden, die zur Verbesserung der Generalisierungsverfahren beitragen können.

Konturüberlappung

Im Unterschied zu den Beispielen in Abschnitt 8.1.2, ist die Genauigkeit der Datenerfassung in diesem Fall nicht bekannt und muss aus diesem Grund empirisch festgestellt werden. Die entsprechenden Untersuchungsergebnisse für den betrachteten Datensatz sind in Abbildung 8.9 zu sehen. Zur besseren Anschaulichkeit werden die Objekte, die keine Veränderung im Rahmen der gewählten Toleranz aufweisen, in grün markiert. Die überlappenden Konturteile werden mit blau geschrichelten Linien gezeigt. Dabei hat sich herausgestellt, dass bei einer Pufferbreite bis einschließlich 0.1 m es sich ausschließlich um geometrische Anpassungen an die Grundrisse handelt, während bei einem Betrag größer als 0.1 m nur noch topologische Veränderungen der Objekte auftreten. Die resultierende Konturüberlappung zwischen den originalen und generalisierten Grundrissen mit der endgültigen Pufferbreite ist in Abbildung 8.14 vergrößert gezeigt.

Bei einer Pufferbreite, die, wie in Abbildung 8.9 rechts unten, gleich der Mindestgröße der Generalisierung ist, sollten alle generalisierten Objekte eine komplette Übereinstimmung mit deren Originalen aufweisen. Für die Objekte, deren maximale Konturabweichung den Generalisie-

rungsschwellwert überschreitet, gilt dies jedoch nicht. Diese sind in der Abbildung durch die fehlende Farbfüllung deutlich erkennbar. Das ist eine weitere Möglichkeit, die unkorrekten Generalisierungslösungen zu identifizieren und entspricht der Evaluierung zum Zweck der Bearbeiten (siehe Abschnitt 2.2.2), wobei der genaue Betrag der Abweichung nicht bekannt zu sein braucht.

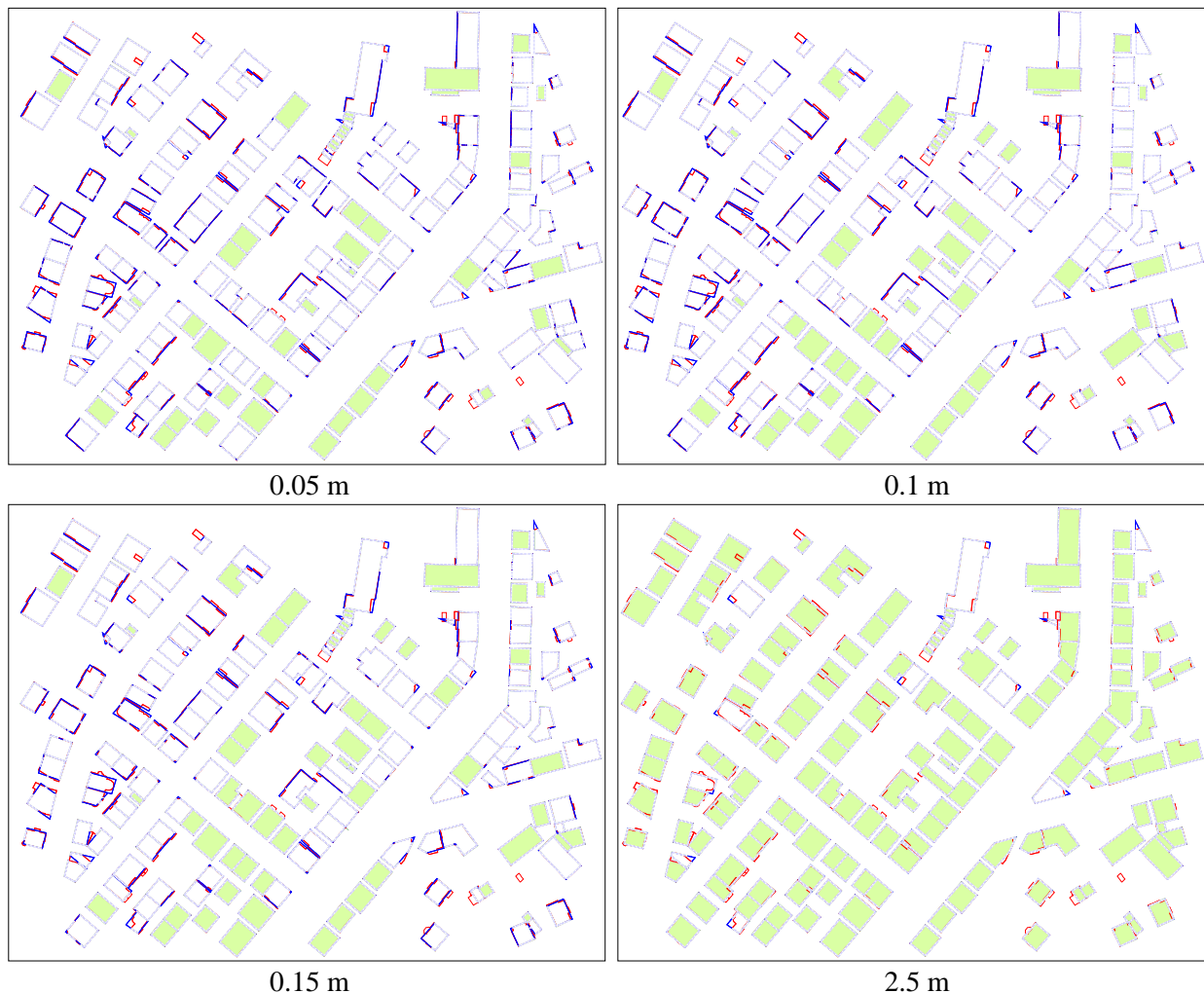


Abbildung 8.9: Konturüberlappung der originalen und generalisierten Grundrisse unter Verwendung unterschiedlicher Pufferbreiten

Während die Qualitätsbewertung der Generalisierung aufgrund der maximalen Konturabweichung in absoluten Größen erfolgt, ist für die Charakteristiken, deren Beträge relativ zur Objektgröße betrachtet werden, die prozentuelle Darstellung angemessener. Dies liegt daran, dass die Minimaldistanz der Generalisierung, auf deren absoluten Betrag sich die Maximalabweichung bezieht, ausnahmslos für den ganzen Datensatz gilt. Im Gegensatz dazu können sich die Werte der Konturüberlappung sowie Flächenabweichungen in Abhängigkeit von der Objektgröße sehr stark unterscheiden. Das Thema der Normierung wurde in vorherigen Kapiteln für jede Charakteristik schon gründlich diskutiert. Somit wird z.B. die Übereinstimmung zwischen den Konturen des originalen und generalisierten Objekts als Anteil der Konturüberlappung berechnet, welcher sich auf den Umfang des Originals bezieht. Im Folgenden ist immer der normierte Wertebereich $[0,100]$ gemeint.

Bei der graphischen Darstellung der resultierenden Qualitätscharakteristiken ist deren statistische Verteilung von großer Bedeutung, da diese sich in der Regel nicht gleichmäßig auf den ganzen

Wertebereich erstreckt. Darüber hinaus stellt die Diskriminierung der Ergebnisse oftmals lediglich innerhalb eines bestimmten Wertebereichs ein Interesse dar. Somit können ab einem bestimmten Schwellwert alle Generalisierungslösungen einfach als fehlerhaft betrachtet werden. Auf diese Weise bietet eine auf den gesamten Wertebereich ausgedehnte Skala, bei der die Einfärbung proportional dem Wert der Charakteristik erfolgt, meistens keine anschauliche Repräsentation der Ergebnisse.

Eine mögliche Lösung zur Darstellung einer ungleichmäßig verteilten Qualitätscharakteristik ist, ein ausgewähltes Farbspektrum nur über den Bereich auszubreiten, der mit Ausnahme der Ausreißer die resultierenden Werte am besten überdeckt. Dies kann durch die Definition von Schwellwerten erzielt werden, welche die erforderlichen Abschnitte des vollen Wertebereichs abgrenzen. Dabei wäre es wünschenswert, die Definition dieser Schwellwerte zu vereinheitlichen, so dass z.B. die unterschiedlichen Charakteristiken mit denselben Einheiten, wie Intrusionen und Extrusionen, nach der gleichen Farbskala dargestellt werden können und damit vergleichbar sind. Jedoch handelt es sich bei diesen Bereichen immer noch um eine proportionale Einfärbung der Werte einer Charakteristik. Ansonsten muss die Farbentwicklung für jeden Bereich extra definiert werden, was ziemlich ineffizient ist.

Statistisch gesehen müssen sich die Werte der Qualitätscharakteristiken bei einer korrekt durchgeführten Generalisierung um einen Nennwert konzentrieren, wobei deren Häufigkeit mit der von dieser Idealgröße wachsenden Distanz sinkt. Diese Tendenz hat sich auch empirisch bewährt. Wie oben schon mehrmals erläutert, beträgt der Nennwert 1 für die Ähnlichkeitsmaße und 0 für die Distanzen. Dementsprechend muss die Darstellung der Qualitätscharakteristiken auf solch eine Weise erfolgen, dass die Werte mit den kleineren Unterschieden vom Nennwert besser diskriminiert werden können. Diese Aufgabe kann aufgrund der Umrechnung der Qualitätscharakteristiken nach einer Funktion, welche sich nicht linear entwickelt, gelöst werden. Die erforderliche Farbeinteilung der Qualitätswerte wird dann durch die Festlegung von Farben proportional zu den Funktionswerten erzielt.

Eine für die beschriebene Wertverteilung passende Funktion stellt der Arkustangens dar, dessen Argumente die geschätzten Größen der betrachteten Qualitätscharakteristik sind. In Abhängigkeit von der Streuung der Werte einer Charakteristik kann die Steigung der Funktion bspw. durch eine Division des Arguments durch einen bestimmten Faktor angepasst werden. Für die richtige Darstellung der Charakteristiken, welche als Ähnlichkeitsmaße berechnet werden, wie z.B. der Anteil der Konturüberlappung, muss die Größe des Arguments x vor der Umrechnung invertiert werden ($100 - x$). Abbildung 8.10 zeigt verschiedene Variationen der gewählten Umrechnungsfunktion, wobei nur der positive Teil des Wertebereichs in Betracht gezogen wird. Dementsprechend erfolgt die Einfärbung der Charakteristiken proportional zu den Funktionswerten zwischen 0 und 45 von grün bis gelb und die der restlichen Werte von gelb bis rot. Dabei variiert die mittlere Grenze, welche dem Funktionswert 45 entspricht und mit einer horizontalen Gerade in der Abbildung markiert ist, in Abhängigkeit von dem dividierenden Faktor. Hier gilt, dass je kleiner der Wert dieses Faktors ist, desto strikter ist die entsprechende Qualitätseinteilung. Somit liegt die mittlere Einfärbungsgrenze (gelb) für die betrachteten Funktionen $f_1 - f_4$ bei 80%, 70%, 60% und 50% der Übereinstimmung zwischen dem originalen und generalisierten Grundriss. Die nach diesen vier Funktionen entstandenen Qualitätsabstufungen der Werte der Konturüberlappung sind in Abbildung 8.11 dargestellt. Wie man den zwei oberen Abbildungen entnehmen kann, sind die nach den ersten zwei Funktionen interpretierten Qualitätswerte zu negativ. Eine bessere Darstellung der Ergebnisse bieten die zwei unteren Abbildungen, wobei die Einfärbung nach der letzten Funktion f_4 eher zu positiv geschätzt wird.

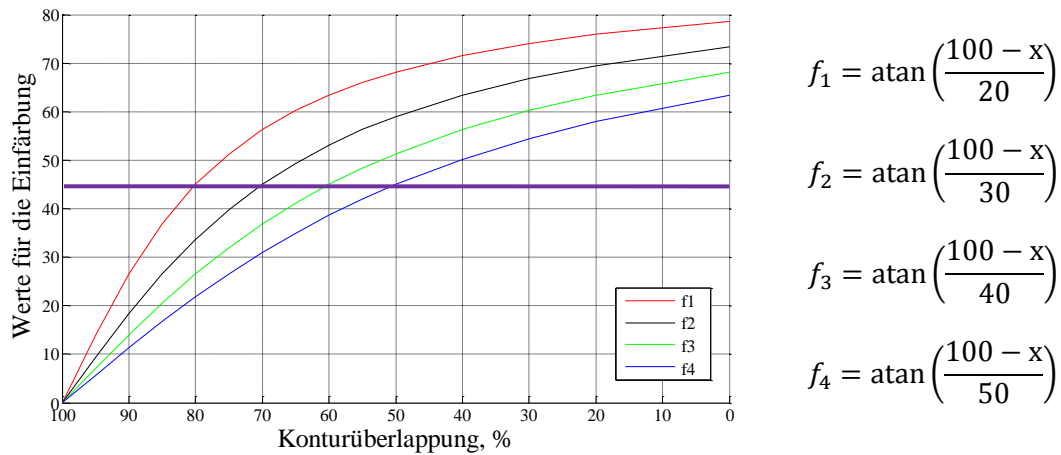


Abbildung 8.10: Berechnungsfunktion der Werte für die Einfärbung der Konturüberlappung

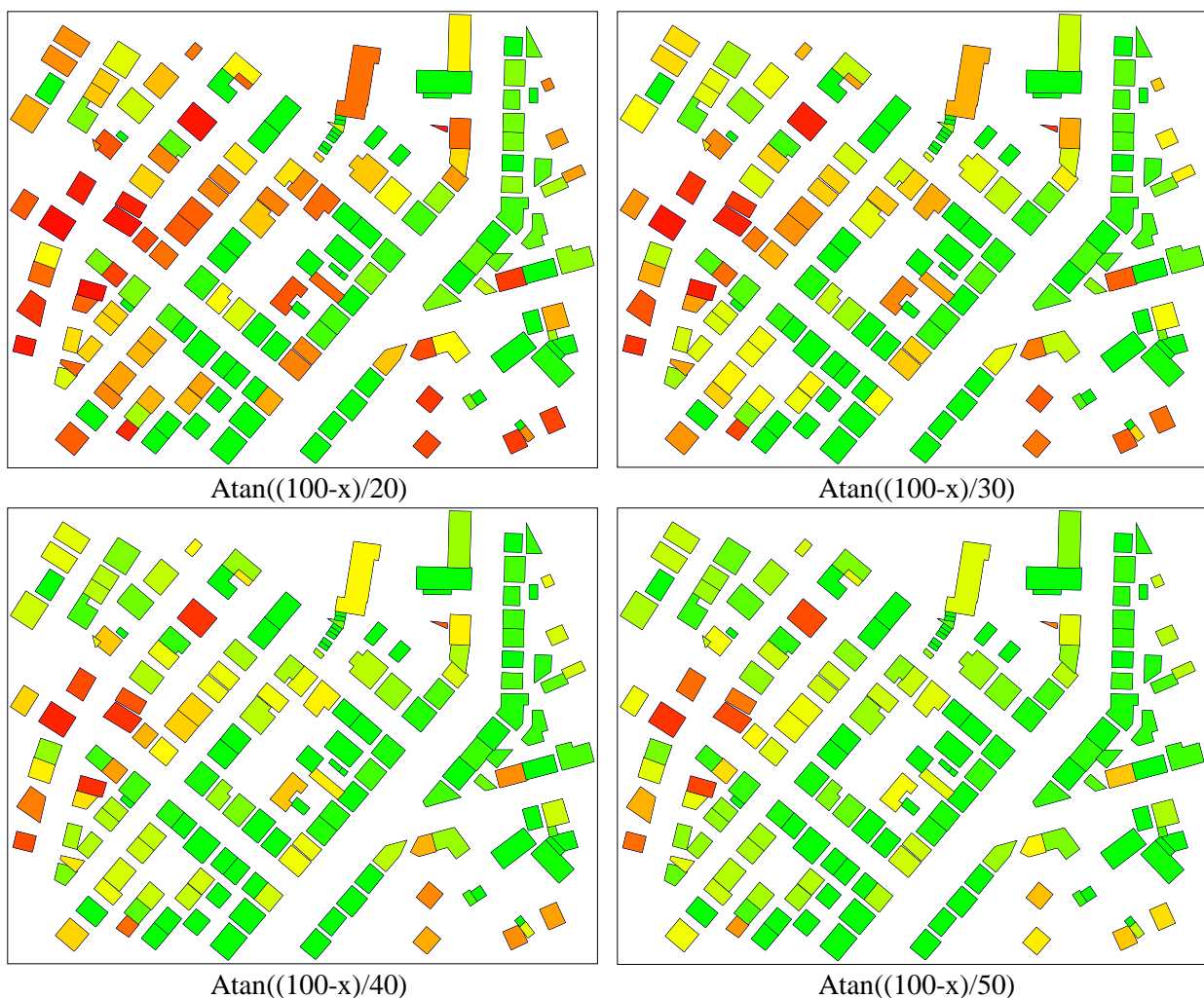


Abbildung 8.11: Unterschiedliche Qualitätsinterpretationen der Werte der Konturüberlappung

Auf diese Weise stellt $f_3 = \operatorname{atan}((100 - x)/40)$ die am besten geeignete Funktion für die Abstufung der Werte der Konturüberlappung dar, welche hier empirisch ermittelt wurde. Die entsprechende Einfärbung dieser Charakteristik nach dem Ampelmodell ist in Abbildung 8.12 mit der gewählten Übergangsskala zum Vergleich dargestellt. Um die übereinstimmende Repräsentation der Ergebnisse zu erreichen, liegen die bei dem Ampelmodell verwendeten Schwellwerte genau in der Mitte der für die Übergangsskala festgelegten Bereiche.

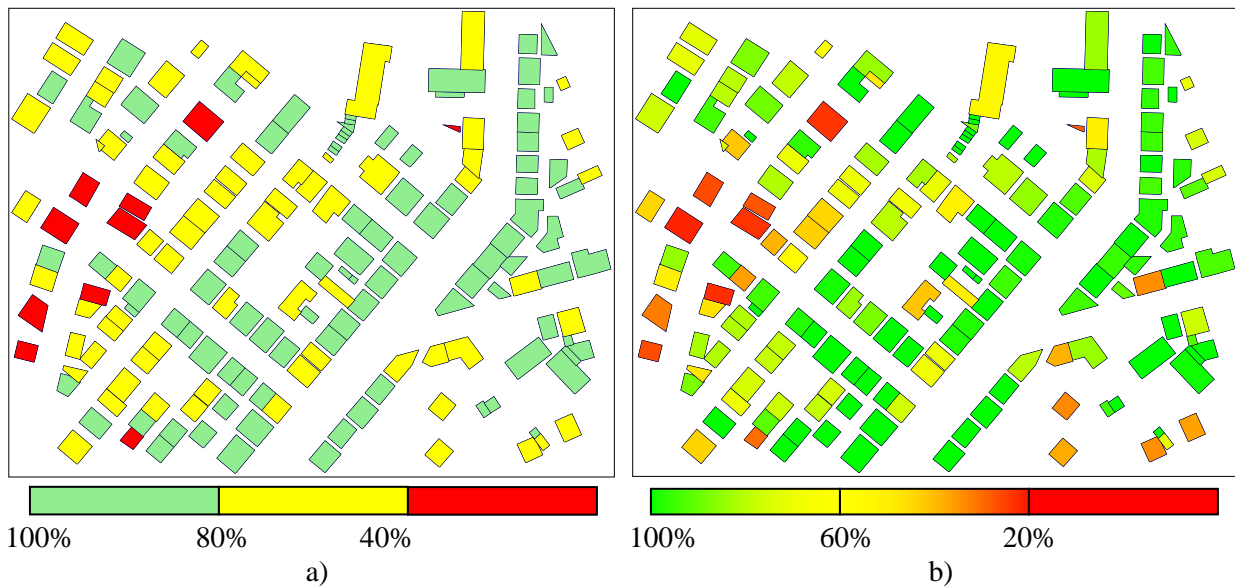


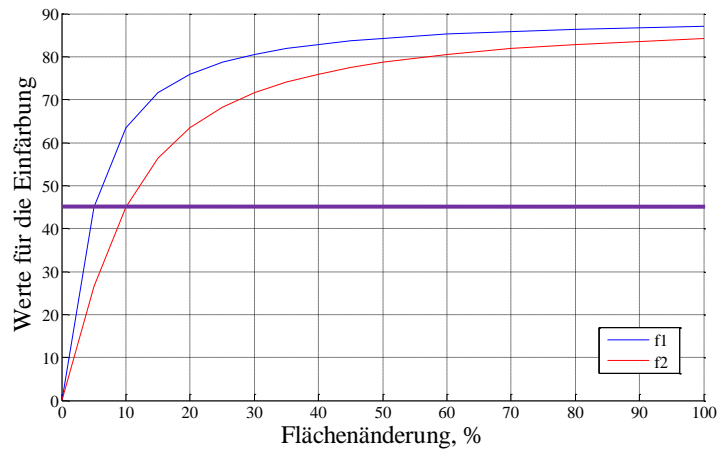
Abbildung 8.12: Endgültige Klassifikation von Beträgen der Konturüberlappung

Allgemein betrachtet hat sich die Abstufung der Qualitätscharakteristiken aufgrund der Umrechnungsfunktionen als sehr vorteilhaft erwiesen. Zum einen hat es die uneingeschränkte Ausnutzung des gesamten Wertebereichs erlaubt. Somit ist die zusätzliche Auswahl von Schwellwerten und Ausnahme von Extremgrößen, wie bei den oben diskutierten Bereichen größter Häufigkeit der Charakteristik, in diesem Fall nicht mehr nötig. Zum anderen können diese Funktionen sehr gut an die Verteilung der Qualitätscharakteristiken angepasst werden, was für die gute Anschaulichkeit und Diskriminierung der Ergebnisse sorgt.

Fläche

In Analogie mit der Konturüberlappung werden auch die Charakteristiken für die Flächenabweichung zwischen dem originalen und generalisierten Grundriss dargestellt. Da deren Streuung deutlich kleiner ist, wird das Argument der Umrechnungsfunktion für die Werte der Extrusionen und Intrusionen jedoch durch den Faktor 5 geteilt. Dabei entspricht die Flächenabweichung zwischen 0 und 5% des Originals dem Darstellungsintervall von grün bis gelb. Die funktionale Abhängigkeit zwischen den berechneten Charakteristiken und deren umgerechneten Werten f_1 ist in Abbildung 8.13 gezeigt.

Was die Werte der Charakteristiken angeht, welche aus der Kombination von Intrusionen und Extrusionen berechnet werden, kann für die Darstellung der Flächendifferenz die gleiche Umrechnungsfunktion verwendet werden. Jedoch sind die Beträge der symmetrischen Differenz ungefähr doppelt so groß. Aus diesem Grund wird der dividierende Faktor im Argument der Umrechnungsfunktion auch verdoppelt (vgl. f_2 in Abbildung 8.13). Die entsprechenden qualitativen Interpretationen von den vier Charakteristiken ist in Abbildung 8.14 zu sehen.



$$f_1 = \operatorname{atan}\left(\frac{x}{5}\right)$$

$$f_2 = \operatorname{atan}\left(\frac{x}{10}\right)$$

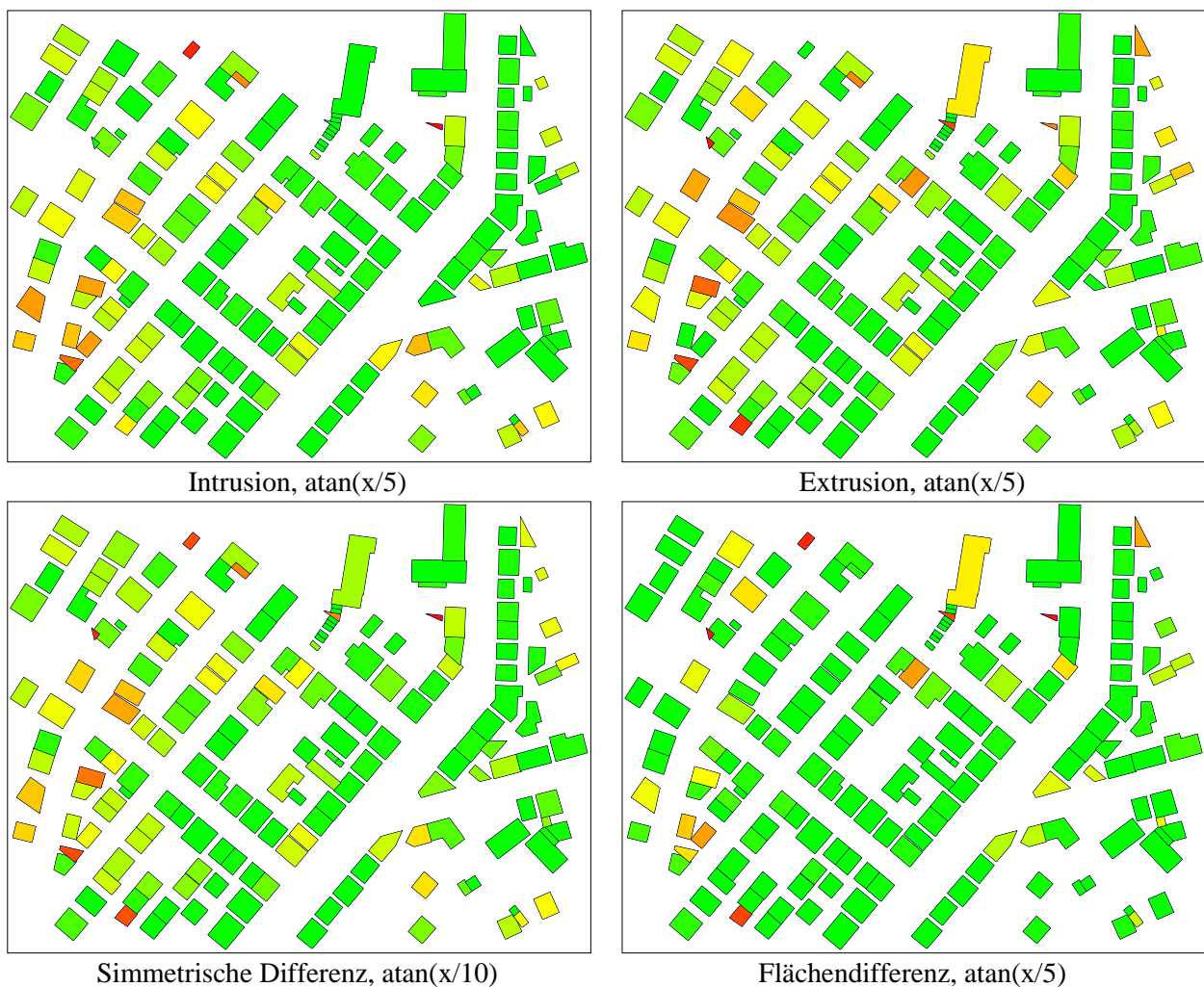


Abbildung 8.13: Evaluierung der Flächenveränderung

Allgemein betrachtet ist die Einfärbung der Qualitätscharakteristiken gemäß einer Übergangsskala deutlich informativer als ein Ampelmodell. Dennoch ist das diskrete Modell bei den vorgegebenen Schwellwerten für die Qualitätsklassen, wie im Fall der maximalen Konturabweichung, für die Darstellung der Ergebnisse besser geeignet. Hauptsächlich ist es dadurch bedingt, dass die Qualitätsbeträge nahe dem Schwellwert kaum voneinander zu unterscheiden sind. Dabei ist es gerade hier von wichtiger Bedeutung festzustellen, ob die Qualitätscharakteristiken unter oder über dem Schwellwert liegen.

Abschließend ist noch einmal darauf hinzuweisen, dass die hier verwendete Einfärbung lediglich im Hinblick auf eine anschaulichere Darstellung und einer besseren Unterscheidbarkeit der Ergebnisse ausgearbeitet wurden und nicht anwendungsbezogen ist.

Die Zusammenfassung der Qualitätscharakteristiken für den generalisierten, sowie angepassten Datensatz ist in Abbildung 8.14 und 8.15 entsprechend gegeben. Hier ist die resultierende Konturüberlappung mit der endgültigen Pufferbreite zu sehen, wobei die Polygone, welche eine komplette Übereinstimmung mit deren Originalen aufweisen, mit grün markiert sind. Die Intrusions- und Extrusionsflächen sind mit rot und blau entsprechend gezeigt.



Abbildung 8.14: Qualitätsbewertung und Repräsentierung der Ergebnisse (generalisierter Datensatz)



Abbildung 8.15: Qualitätsbewertung und Repräsentierung der Ergebnisse (angepasster Datensatz)

8.2.2. Vergleich alternativer Generalisierungen eines Datensatzes

Die oben beschriebene Darstellung der Qualitätsergebnisse kann auch für den Vergleich alternativer Generalisierungen eines Datensatzes eingesetzt werden. Basiert auf dieser Vorgehensweise werden im Folgenden die Qualität der generalisierten (links) und die an die Kontur des originalen Objekts angepassten Grundrisse (rechts) gegenübergestellt.

Eigenschaften der Generalisierungslösungen

Der Vergleich von Abbildung 8.16 a) und b) veranschaulicht, dass die maximale Abweichung durch die Konturanpassung quantitativ verschlechtert wird. Dementsprechend wird der Abstand zwischen dem originalen Grundriss und dessen Generalisierung in der Regel größer, wenn die Vorgehensweise der Generalisierung sich nach der Betonung der dominierenden Fassadenlinien richtet und nicht eine mittlere Position annimmt. Was die qualitative Bewertung angeht, weisen die Ampelmodelle beider Generalisierungen keine Unterschiede auf, da die quantitativen Veränderungen ausschließlich innerhalb der definierten Qualitätsklassen stattgefunden haben (siehe Abbildung 8.8 a)).

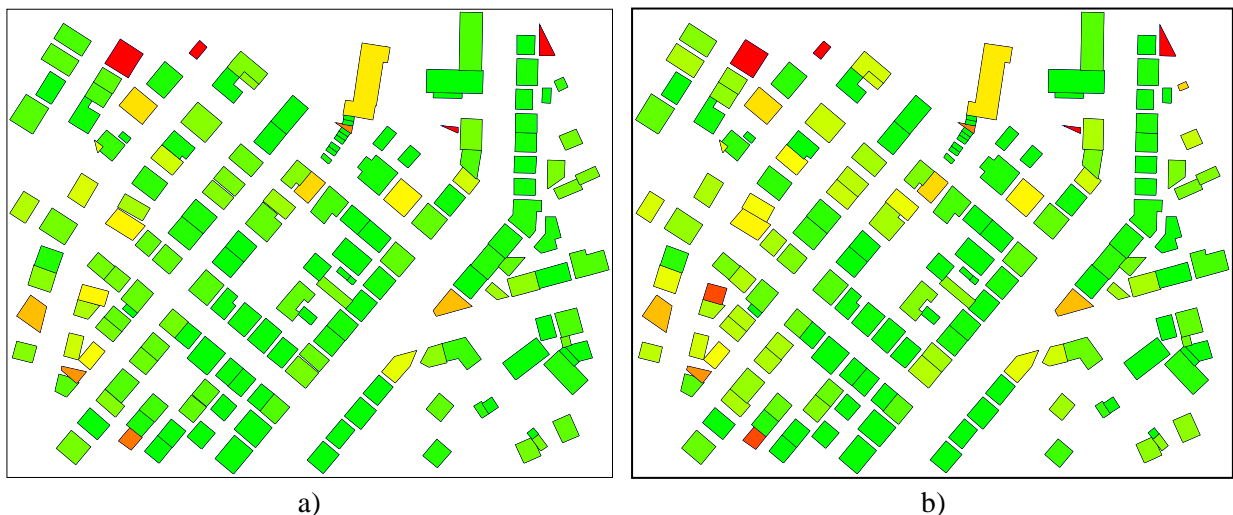


Abbildung 8.16: Maximale Konturabweichung a) des generalisierten und b) angepassten Datensatzes

Wie man Abbildung 8.17 entnehmen kann, ist der Anteil von Intrusionen und Extrusionen für den generalisierten Datensatz ungefähr gleich. Dies spiegelt auch den Zweck des verwendeten Generalisierungsansatzes wider, welcher den räumlichen Ausgleich bei der Simplifizierung eines 3D-Gebäudemodells verfolgt. Somit hat die qualitative Bewertung gezeigt, dass die resultierenden Flächen der entsprechenden Grundrisse im Vergleich zum Original auch ziemlich gut ausgeglichen sind. Nach der Konturanpassung werden die Intrusionsflächen insgesamt ein wenig reduziert, obwohl gleichzeitig einige Ausreißer entstanden sind, wie z.B. der Grundriss 87 und 186 (siehe Anhang D). Wiederum hat der Anteil von Extrusionen etwas zugenommen. Die symmetrische Differenz, welche den gesamten Betrag von Intrusionen und Extrusionen angibt, weist in den beiden Fällen ähnliche Ergebnisse auf. Auf diese Weise bleibt der Betrag der summierten Flächenveränderung nach der geometrischen Konturanpassung gleich, wobei sich lediglich die räumliche Verteilung ihrer Strukturelemente verändert.

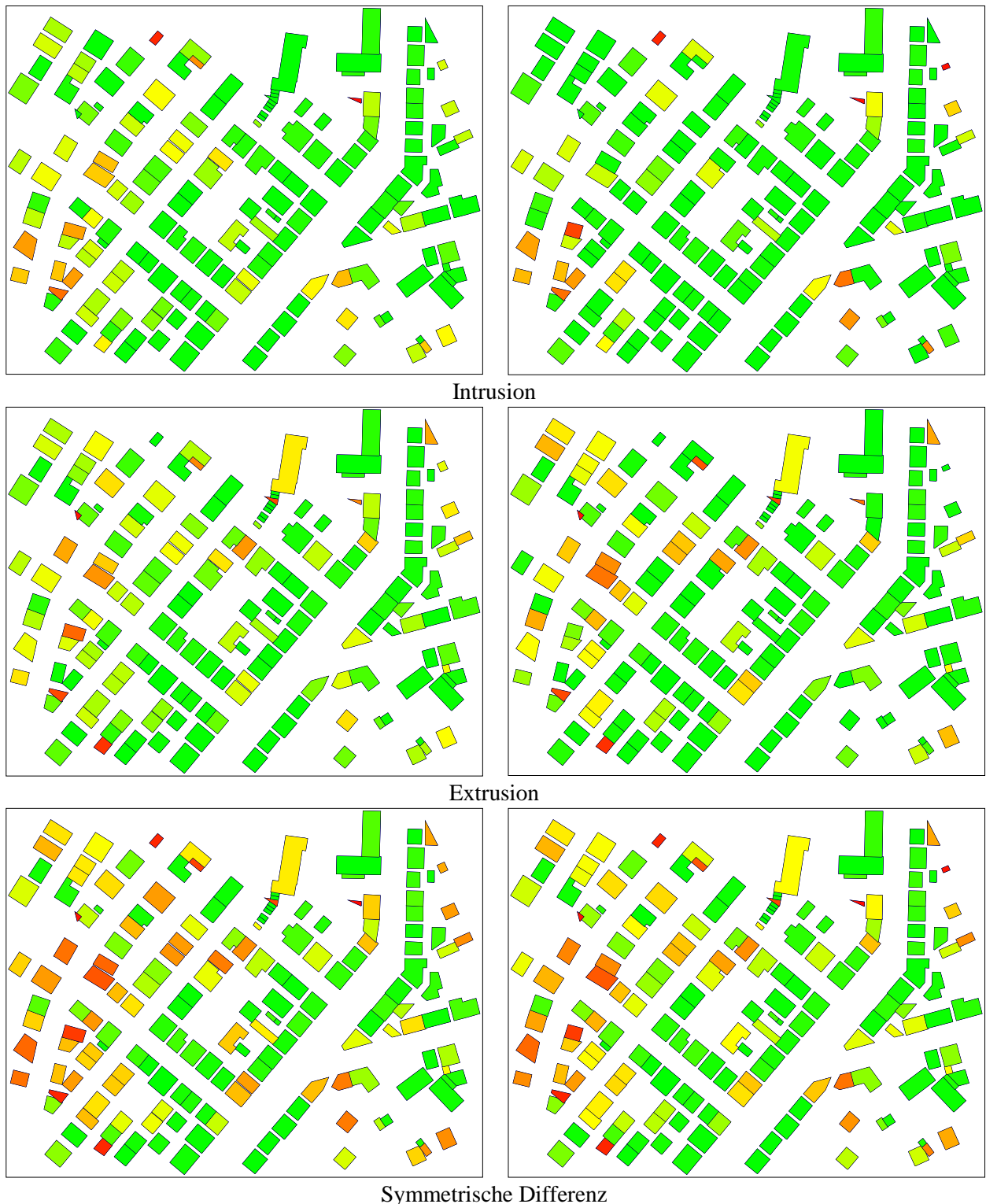


Abbildung 8.17: Flächenbezogene Qualitätscharakteristiken der generalisierten (links) und angepassten (rechts) Grundrisse

Dennoch ist die Tendenz der Entwicklung von Intrusionen und Extrusionen nach der Konturanpassung eines generalisierten Grundrisses nicht sehr gravierend, wie die obere Abbildung darstellt. Da diese Charakteristiken zusammen die Flächenveränderung eines Objekts zum Ausdruck bringen, ist deren kombinierte Charakteristik Flächendifferenz, die in Abbildung 8.18 gezeigt ist, deutlich anschaulicher. Somit weist die Konturüberlappung (oben) nach der Anpassung tatsäch-

lich wesentlich bessere Ergebnisse auf, was sehr positiv den entsprechenden Ansatz charakterisiert, während die Flächendifferenz (unten) sichtbar schlechter wird.

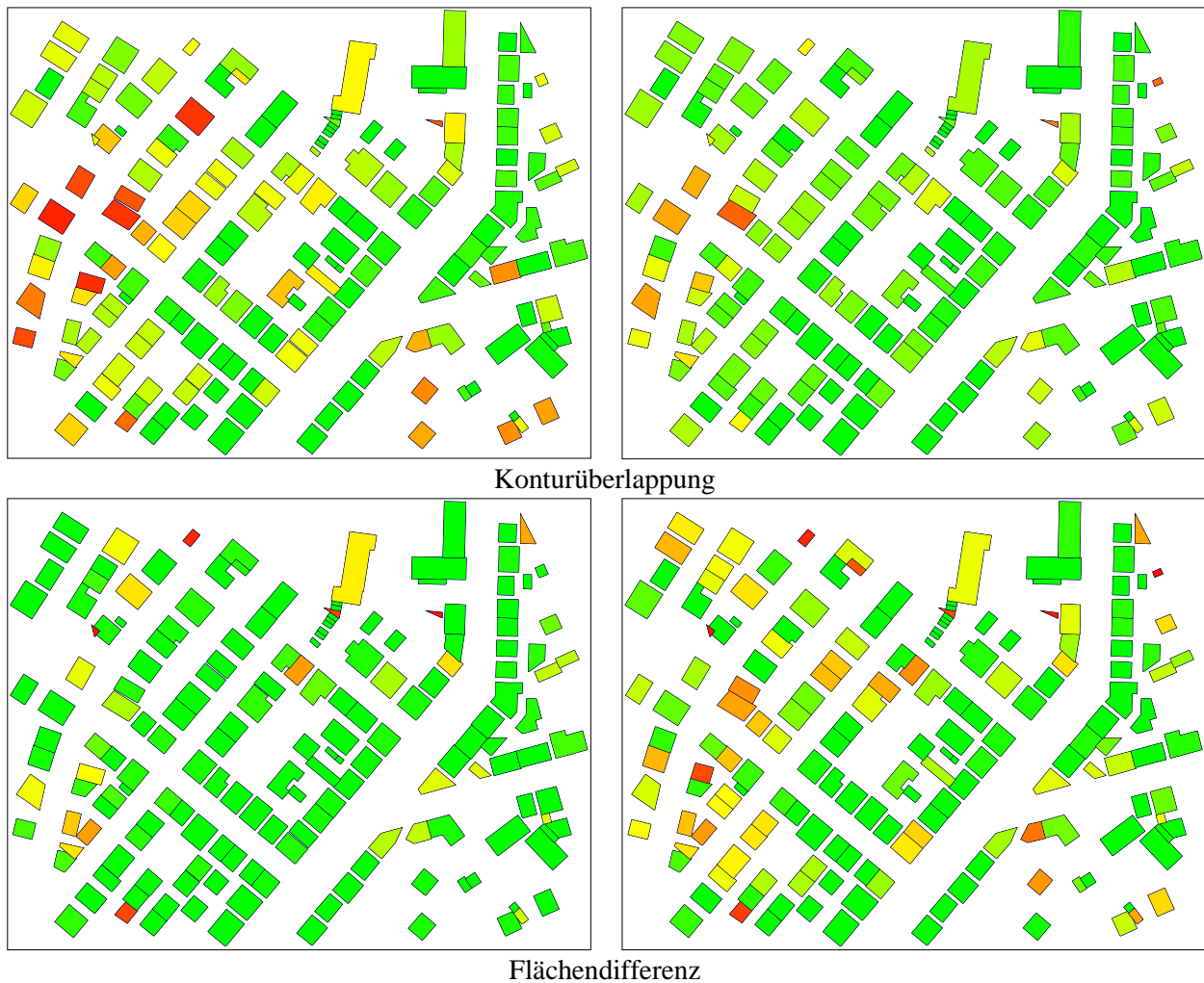


Abbildung 8.18: Konturübereinstimmung und Flächendifferenz der generalisierten (links) und angepassten (rechts) Grundrisse

Die vorliegende Qualitätsanalyse zeigt, dass die vorgeschlagenen Charakteristiken sinnvolle Ergebnisse liefern und sich sehr anschaulich darstellen lassen, was eine gute Wahrnehmung der Qualitätsinformationen und deren Vergleich ermöglicht.

Aggregation der Qualitätscharakteristiken zum Vergleich alternativer Generalisierungen

Für die gesamtheitliche Charakterisierung des generalisierten und angepassten Datensatzes wird die Aggregation der Qualitätscharakteristiken laut der in Abschnitt 8.1.2 beschriebenen Vorgehensweise durchgeführt, deren Ergebnisse in Abbildung 8.19 dargestellt sind. Hier ist zu sehen, dass die Charakteristiken einander ausgeglichen haben, so dass die Werte der Gesamtqualität praktisch identisch für alle Grundrisse sind. Dabei ist die gewählte Umrechnungsfunktion $y = \text{atan}(100 - x)/5$ sehr sensibel und erlaubt, die Qualitätsunterschiede innerhalb von 5 % sehr gut zu diskriminieren.

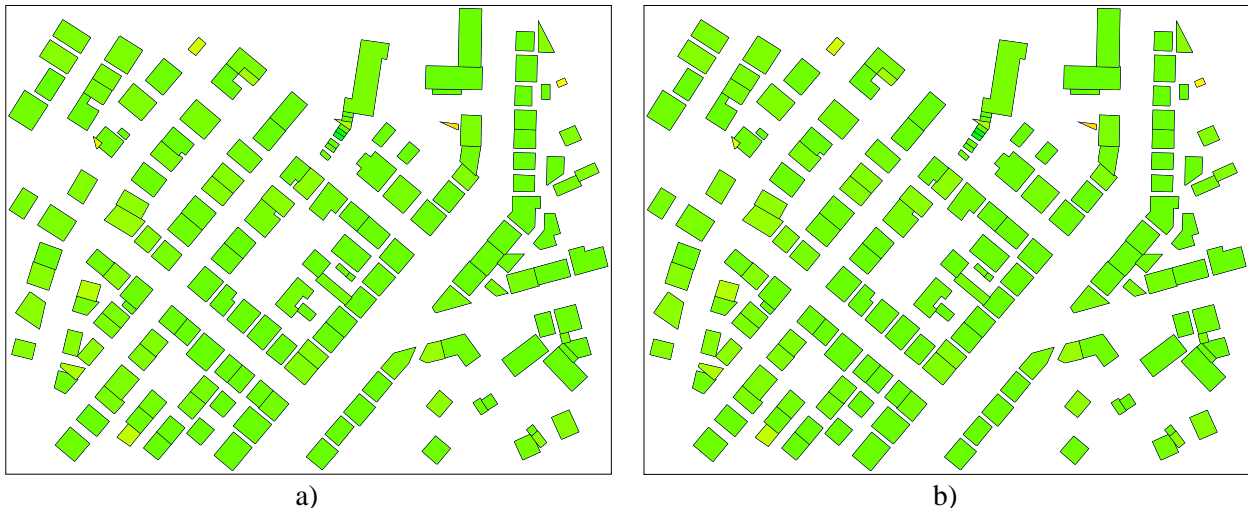


Abbildung 8.19: Aggregierte Qualitätscharakteristik für den a) generalisierten und b) angepassten Datensatz

Dieses Ergebnis spiegelt die Tatsache wider, dass die Verbesserung einer Charakteristik in der Regel die Verschlechterung einer Anderen zur Folge hat, wie es oben hinsichtlich Intrusionen und Extrusionen oder Konturüberlappung und Flächendifferenz gezeigt wurde. Auch wenn die Aggregation der Qualitätscharakteristiken für komplexe Grundrisse sinnvolle Ergebnisse geliefert hat, ist diese zur Charakterisierung einfacher Konturen, welche typisch für Wohngebiete sind, ungeeignet. Dementsprechend müssen die vorgeschlagenen Charakteristiken für solche Grundrisse einzeln betrachtet werden, da diese unterschiedliche und oftmals gegenseitig ausschließende Qualitätsaspekte der Generalisierung zum Ausdruck bringen.

Zusammenfassende Charakterisierung von Generalisierungen

Bei der Betrachtung eines Datensatzes ist nicht nur die Beschreibung von einzelnen Objekten von Interesse, sondern vielmehr deren Charakterisierung in ihrer Gesamtheit. Auf diese Weise kann jede Qualitätscharakteristik aufgrund von verschiedenen statistischen Parametern, wie Mittelwert, Standardabweichung und Medianwert, für den ganzen Datensatz aggregiert werden, wobei unterschiedliche Eigenschaften dieser Charakteristik widerspiegelt werden. Anstatt verschiedene Charakteristiken für jedes einzelne Objekt zu aggregieren, was, wie oben beschrieben, nicht immer sinnvoll ist, können alternative Datensätze auf Basis der einzelnen Charakteristiken miteinander verglichen werden. Die entsprechende Vorgehensweise ist im Folgenden ausführlich erläutert.

Zuerst können die quantitativen Veränderungen eines Datensatzes allgemein charakterisiert werden, wie es in Tabelle 8.5 gezeigt ist. Hier gelten Objekte als unverändert, wenn deren Konturen komplett innerhalb des Puffers mit der gewählten Breite 0,1 m liegen. Auf diese Weise werden die kleinen geometrischen Anpassungen hinsichtlich Rechtwinkligkeit, Parallelität und Kollinearität nicht in Betracht gezogen. In der Tat ist in jedem der Datensätze kein einziges Objekt unverändert geblieben. Die fehlerhaft generalisierten Grundrisse werden vor allem aufgrund der maximalen Konturabweichung, welche die Mindestgröße der Generalisierung von 2,5 m überschreitet, identifiziert. Dabei werden die Generalisierungen, deren Maximalabweichung vom Original nicht sehr groß ist und in dem Fall zwischen 2,5 m und 3 m variiert, als Objekte, die eine Nachbesserung brauchen, eingestuft. Dennoch ist die konsequente Prüfung der restlichen Parameter nötig, da manche Fehler sich lediglich durch eine einzige Charakteristik erweisen können, während alle anderen Werte in Ordnung sind. Nach der Aussortierung der offensichtlich

fehlerhaften Lösungen wird die statistische Auswertung für jede Qualitätscharakteristik innerhalb des generalisierten und angepassten Datensatzes durchgeführt (vgl. Tabelle 8.6 und Tabelle 8.7). Hier sind alle Parameter außer der maximalen Konturabweichung in Prozent angegeben. Dabei ist auch zu beachten, dass der Anteil der Konturüberlappung (OI) ein Ähnlichkeitsmaß ist, dessen Idealwert 100 ist. Die restlichen Charakteristiken sind dem gegenüber als Distanzen berechnet, so dass sinkende Werte bessere Ergebnisse darstellen.

Datensatz	Gesamtanzahl der Objekte	Anzahl der reduzierten Objekte	Anzahl unveränderter Objekte	Fehleranzahl	Objekte, die eine Nachbesserung brauchen
Original	196	25	56	14	5
Angepasst	196	25	58	15	5

Tabelle 8.5: Allgemeine Charakterisierung der Generalisierungen

Für die Fehleridentifizierung werden auch die Eigenschaften beider Datensätze berücksichtigt. Diese Tatsache ist mithilfe der ersten Charakteristik zum Ausdruck gebracht. Somit beträgt die minimale zulässige Konturüberlappung bei dem angepassten Datensatz ca. 64 %, während alle übrigen Lösungen als fehlerhaft aussortiert werden. Im Gegensatz dazu wird diese Charakteristik bei dem generalisierten Datensatz überhaupt nicht in Betracht gezogen, so dass die minimale Konturüberlappung hier 18,2 % ist. Es liegt daran, dass die generalisierten Linien bei dem Flächenausgleich oftmals eine mittlere Position zwischen den Fassadenlinien annehmen müssen. Aus diesem Grund kann die Konturüberlappung einen sehr niedrigen Wert aufweisen. Genau anders herum ist es bei der Flächendifferenz. Diese weist für den angepassten Grundriss einen Maximalwert auf, welcher doppelt so groß ist wie für den einfach generalisierten Fall. Hier ist es jedoch ziemlich schwierig, Fehler ohne Kontext und allein auf dem Wert dieser Charakteristik basierend zu identifizieren. Insbesondere betrifft es die Grundrisse, die lediglich über ein oder zwei Eckversprünge verfügen. Dabei werden typischerweise die Fassadenlinien zu deren Schnitt verlängert, so dass nicht ausgeglichene Intrusionsflächen entstehen. Wie im Kapitel 3 gezeigt, wird solch eine Simplifizierung eines Eckversprungs von einem menschlichen Betrachter als die beste Lösung wahrgenommen. Aus diesem Grund können diese Generalisierungslösungen nicht als fehlerhaft interpretiert werden.

Die durchschnittliche Größe jeder Charakteristik sowie die Werteverteilung wird durch den Mittelwert und dessen Standardabweichung charakterisiert. Der Mittelwert ist jedoch sehr sensibel gegenüber Ausreißern. Aus diesem Grund wird eine weitere Charakteristik berechnet, welche die Verteilung besser reflektiert. Diese ist der Median, welcher in der Mitte einer Menge von gegebenen Werten liegt. Somit liegt der Mittelwert der Flächendifferenz für den generalisierten Datensatz bei 0,7 %, während der Medianwert, der die Konzentration der meisten Werte besser widerspiegelt, praktisch gleich 0 ist. Dies spricht dafür, dass der Ausgleich von Intrusions- und Extrusionsflächen für die meisten Grundrisse des generalisierten Datensatzes gut gelungen ist. Zum Vergleich beträgt der Median der Flächendifferenz nach der Konturanpassung 0,5 %. Allgemein sind die Medianwerte aller Charakteristiken für die beiden Datensätze merkbar positiver als deren Mittelwerte.

Schließlich wird die Gesamtveränderung eines Datensatzes hinsichtlich aller Charakteristiken mit Ausnahme der maximalen Konturabweichung berechnet. Den größten Unterschied in der Qualität nach der Konturanpassung weist der Anteil der Konturüberlappung, welcher fast 9 %

größer als direkt nach der Generalisierung ist. Die Beträge von Intrusionen und Extrusionen sind dabei auch etwas besser, werden jedoch schlechter durcheinander ausgeglichen. Auf diese Weise ist die Fläche der Grundrisse um 0,3 % nach der Generalisierung und 0,6 % nach der Anpassung im Vergleich zu dem originalen Datensatz größer geworden.

Qualitätscharakteristik	Maximaler Konturabweichung	Anteil von Konturüberlappung	Intrusionen	Extrusionen	Symmetrische Differenz	Flächendifferenz
Maximalwert (min für OI)	2,872 m	18,19	0,10	13,69	22,4	8,99
Mittelwert	0,656	81,88	1,60	1,74	3,34	0,67
Standardabweichung	-	19,78	2,11	2,22	3,99	1,57
Median	0,388	90,38	0,51	0,65	1,29	0,03
Gesamtveränderung	-	78,56	1,77	2,09	3,87	0,32

Tabelle 8.6: Gesamtqualität des generalisierten Datensatzes

Qualitätscharakteristik	Maximaler Konturabweichung	Anteil von Konturüberlappung	Intrusionen	Extrusionen	Symmetrische Differenz	Flächendifferenz
Maximalwert (min für OI)	2,872 m	63,98	12,31	16,13	16,38	15,88
Mittelwert	0,805 m	90,31	1,05	1,70	2,76	2,13
Standardabweichung	-	10,07	2,12	2,66	3,19	2,97
Median	0,454 m	92,06	0,18	0,32	1,09	0,53
Gesamtveränderung	-	87,53	1,41	2,04	3,45	0,63

Tabelle 8.7: Gesamtqualität des angepassten Datensatzes

9 Diskussion und Ausblick

Die Qualität von Geodaten stellt aufgrund ihrer Vielfältigkeit, Heterogenität und angestrebter Interoperabilität in Geodateninfrastrukturen ein äußerst vielschichtiges und komplexes Themengebiet dar, wobei die Normung auch hier eine besonders wichtige Rolle spielt. Die einheitliche Beschreibung der Eigenschaften eines Datensatzes ist notwendig, um ein besseres Verständnis bei der Einschätzung der anwendungsbezogenen Eignung und der Vergleichbarkeit übereinstimmender Informationen zu erhalten. Das Thema ist dadurch so aktuell wie nie zuvor, da durch die Entwicklung neuer und effizienterer Erfassungsmethoden ein drastisches Wachstum an Datenmengen zu verzeichnen ist, sowie der Übergang hin zu digitalen Formaten vollzogen und die vollständige Automatisierung von Vorgängen wie Austausch, Analyse und Prozessierung von Geodaten schon längst im vollen Gange ist.

In diesem Zuge haben viele klassische Aufgaben der Geodäsie und Kartographie eine neue Bedeutung erhalten, vor allem sind manche davon noch spezifischer geworden. Da die normierten Qualitätselemente sehr allgemein (im Sinne von generisch) definiert sind, benötigen diese oftmals für die Bewertung eigene und speziell dafür ausgearbeitete Qualitätskriterien. Die vorliegende Arbeit widmet sich insbesondere der Qualitätsbewertung der kartographischen Generalisierung von Gebäudegrundrissen. Dabei handelt es sich um fertig prozessierte Daten, welche unabhängig vom eigentlichen Generalisierungsansatz quantitativ und qualitativ bewertet werden müssen. Hier besteht die Fragestellung grundsätzlich aus drei Aufgaben, welche als Fehleridentifizierung, deskriptive Bewertung und Vergleich alternativer Generalisierungslösungen bezeichnet werden können. Die im Laufe dieser Forschungsarbeit erhaltenen Erkenntnisse sollen im Bezug zu diesen Bewertungsstufen im Folgenden diskutiert werden.

Die kartographische Generalisierung betrifft in erster Linie die Visualisierung von Geodaten und findet auf der graphischen Ebene statt. Aus diesem Grund stehen im Fokus ihrer Bewertung verschiedene Aspekte der geometrischen Genauigkeit. Allgemein gesehen ist die Qualitätsbewertung der Generalisierung mit der Ähnlichkeitsschätzung zweier Objekte vergleichbar, wobei der Veränderungsgrad des Originals infolge des Generalisierungsvorgangs beurteilt werden muss. Das Problem der Ähnlichkeitsschätzung ist schon hinreichend aus den Bereichen der Objekterkennung und Zuordnung, sowie der bildbasierten Suche bekannt. Demgemäß wird die Geometrie eines Objekts durch vier Eigenschaften: Form, Größe, Position und Orientierung charakterisiert, zu deren Beschreibung unterschiedliche Charakteristiken verwendet werden können. Insbesondere beim Vergleich der Objektform, welche im Rahmen dieser Arbeit speziell im Fokus steht, wird zwischen geometrischen und funktionalen Verfahren unterschieden. Bei den geometrischen Verfahren werden Objekte entweder aufgrund entsprechender Charakteristiken oder unmittelbar durch die Berechnung der direkten Distanzen miteinander verglichen. Der funktionale Vergleich impliziert die Repräsentation von 2D-Konturen als 1D-Funktionen, welche ebenso gegenübergestellt werden können.

Die meisten existierenden Ansätze zur Qualitätsbewertung der Generalisierung widmen sich Kartenwerken der Maßstäbe kleiner 1:10.000, deren Abstraktionsniveau sehr hoch ist. Aus diesem Grund werden hier eher allgemeine Formcharakteristiken wie Rechtwinkligkeit, Ausdehnung oder Konkavität verwendet. In den größeren Maßstäben ist die vereinfachte Form eines Objekts immer noch gut erkennbar, wobei die lokalen Veränderungen im Konturverlauf vom großen Interesse sind. Die einzige Charakteristik, die zu diesem Zweck in der relevanten Literatur bislang verwendet wird, ist die Turning-Funktion. Im Laufe der Untersuchung hat sich jedoch herausgestellt, dass gerade diese Charakteristik für die quantitative Schätzung der Unterschiede zwischen dem originalen und generalisierten Grundriss nicht so gut geeignet ist. Aufgrund der

unterschiedlichen Konturlänge der beiden Objekte, welche infolge der Generalisierung meistens kürzer wird, können die tatsächlich übereinstimmenden Kontursegmente beim Vergleich mit der Turning-Funktionen verschoben sein oder auch die im Raum versetzten Segmente dabei übereinander liegen. Letztendlich können die entstehenden Überlappungen derselben Turning-Funktionen sich in Abhängigkeit von der Wahl des Referenzpunktes auch ziemlich stark unterscheiden. Aus diesem Grund wurde diese Charakteristik nicht weiter verfolgt.

Es wurde außerdem festgestellt, dass für die Schätzung der lokalen Formunterschiede zwischen zwei Grundrissen sich diejenigen Charakteristiken, die auf der Distanzberechnung basieren, am besten eignen. Demgemäß werden die Objekte direkt miteinander verglichen, wobei zwei unterschiedliche Aspekte wie Kontur- und Flächentreue des generalisierten Grundrisses in Bezug auf das Original in Betracht gezogen werden können. Um jede Vorkenntnis über die Zuordnung von Elementen beider Grundrisses zu vermeiden, werden die Objekte als Punktmengen betrachtet. Somit fundiert die Berechnung der vorgeschlagenen Qualitätscharakteristiken auf den Standardoperatoren der Mengentheorie. Alle Charakteristiken außer maximaler Konturabweichung werden in Prozent berechnet, wobei deren Werte auf die Größe des Originals, Umfang oder Fläche entsprechend, normiert werden. Das Thema wurde für jede einzelne Charakteristik ausführlich diskutiert.

Die Aussagekraft der vorgeschlagenen Charakteristiken sowie deren anschauliche Darstellung wurden sowohl für einzelne Grundrisse, als auch für ganze Datensätze betrachtet. Somit wurde die Evaluierung auf Mikro- und Makroebene entsprechend durchgeführt. Dabei werden zum einem die quantitativen Veränderungen von Objekten geschätzt, und zum anderen der Vergleich alternativer Generalisierungslösungen erläutert.

Als Erstes wird die Maximalabweichung zwischen den Konturen eines originalen und eines generalisierten Objekts geschätzt, deren Größe die Mindestgröße der Generalisierung nicht überschreiten darf. Diese Bedingung kann als primäre Korrektheitskontrolle für jede konkrete Lösung verwendet werden. Die Analyse von Ergebnissen hat gezeigt, dass dadurch die meisten Fehler der Generalisierung sofort ausgeschlossen werden können. Jedoch genügt diese Kontrolle allein nicht und die restlichen Charakteristiken müssen auch geprüft werden. Der Anteil der Konturüberlappung stellt eine weitere Charakteristik dar, welche den Verlauf zweier Konturen mit einer bestimmten Toleranz erlaubt. Somit werden kleine geometrische Anpassungen des originalen Objekts hinsichtlich der Rechtwinkligkeit, Parallelität und Kollinearität nicht zu den Konturveränderungen gezählt. Dementsprechend ist die Wahl der richtigen Breite des Toleranzpuffers, worauf diese Charakteristik basiert, von entscheidender Bedeutung. Die erhaltenen Ergebnisse veranschaulichen, dass die Pufferbreite entweder aufgrund von Messgenauigkeit oder empirisch, wenn die Genauigkeit unbekannt bleibt, geschätzt werden kann. Bei der Pufferbreite, die gleich der Mindestgröße der Generalisierung ist, sollen generalisierte Konturen eine komplette Übereinstimmung mit deren Originalen aufweisen. Dies ist auch eine schnelle Möglichkeit, die unkorrekten Generalisierungslösungen auszusortieren, da der eigentliche Betrag der Konturabweichung nicht berechnet werden muss. Letztendlich wird die Flächentreue des generalisierten Grundrisses im Vergleich zu dessen Original geschätzt, wodurch die räumliche und quantitative Flächenveränderung des Objekts charakterisiert wird. Bei der Visualisierung aller entwickelten Charakteristiken werden neben der maximalen Konturabweichung und Konturüberlappung auch die Bestandteile der Flächenveränderung, Intrusionen und Extrusionen gezeigt. Für einen Datensatz können die infolge der Generalisierung unveränderten Objekte extra markiert werden, da diese visuell nicht so einfach und schnell zu erkennen sind.

Was die qualitative Interpretation der Charakteristiken betrifft, kann die Visualisierung entweder anhand eines Ampelmodells oder einer Übergangsskala erfolgen. Die Klassifizierung der Evaluierungsergebnisse nach den Qualitätsklassen ist grundlegend anwendungsabhängig. In der vorliegenden Arbeit wird jedoch ausschließlich von einer guten Diskriminierung der Ergebnisse ausgegangen. Es hat sich herausgestellt, dass bei den vorgegebenen Schwellwerten, wie der Mindestgröße der Generalisierung, sich das Ampelmodell besser eignet, um die betragsmäßig nah am Schwellwert gelegenen Qualitätsbeträge eindeutig zu unterscheiden. Solch eine Charakteristik stellt die maximale Konturabweichung dar. Für die Wiedergabe der Variationen innerhalb einer Qualitätsklasse wird die Übergangsskala verwendet, welche deutlich informativer als das Ampelmodell ist. Bei der graphischen Darstellung der Qualitätscharakteristiken muss auch unbedingt die statistische Verteilung der Werte berücksichtigt werden, um die optimale Diskriminierung der Ergebnisse zu gewährleisten. Zu diesem Zweck kann die qualitative Interpretation quantitativer Charakteristiken mithilfe einer Funktion durchgeführt werden, welche der Verteilung und dem Wertebereich einer jeden Charakteristik am besten entspricht. Die Wahl einer solchen Funktion wird für jede einzelne Charakteristik im Rahmen der Arbeit ausführlich diskutiert.

Für den Vergleich alternativer Lösungen eines Grundrisses wird ein Aggregationsverfahren für die hier entwickelten Charakteristiken vorgeschlagen, welches die Qualität jeder Lösung als ein einzelnes Qualitätsmaß ausdrückt. Zu diesem Zweck werden alle Distanz-Charakteristiken in Ähnlichkeitsmaße umgewandelt und nach der euklidischen Distanz aggregiert. Diese Vorgehensweise funktioniert sehr gut für die Objekte mit komplexer Form, den sogenannten Landmarken. Dennoch hat sich am Beispiel der Qualitätsbewertung eines Datensatzes herausgestellt, dass für Gebäudegrundrisse mit relativ einfachem Konturverlauf welche typisch für Wohngebiete sind, sich die Charakteristiken hinsichtlich Kontur und Fläche gegenseitig ausgleichen. Aus diesem Grund müssen alternative Lösungen für solche Grundrisse eher nach den einzelnen Charakteristiken bemessen werden. Die Qualitätsanalyse zweier alternativen Generalisierungen eines Datensatzes hat gezeigt, dass die größte Aussagekraft über die Eigenschaften eines Datensatzes der Anteil der Konturüberlappung und Flächendifferenz besitzen. Diese zwei Charakteristiken widerspiegeln, inwieweit die Gebäudegrundrisse des betrachteten Datensatzes entweder kontur- oder flächentreu sind und können nicht gleichzeitig optimiert werden. In Abhängigkeit von den festgestellten Eigenschaften kann auch die qualitative Interpretation der quantitativen Charakteristiken durchgeführt werden. Somit werden die fehlerhaften Generalisierungslösungen für die konturtreuen Lösungen in erster Linie nach dem Anteil der Konturüberlappung gesucht, während die Flächentreue durch die Flächendifferenz identifiziert wird. Dabei kann die Konturüberlappung bei den guten flächentreuen Lösungen sehr niedrig sein und muss unbeachtet bleiben. Letztendlich werden die alternativen Lösungen eines Datensatzes aufgrund von einzelnen Charakteristiken nach folgenden Parametern verglichen: Maximal- und Mittelwert, Standardabweichung, Median und Gesamtveränderung. Hier ist am meisten der Median zu beachten, da diese Charakteristik am besten die Verteilung einer Qualität widerspiegelt.

Der Vorteil dieses Ansatzes besteht darin, dass die Unterschiede zwischen dem originalen und generalisierten Grundriss objektiv und sehr genau geschätzt werden können. Darüber hinaus sind die ausgearbeiteten Qualitätscharakteristiken direkt auf 3D übertragbar. Hierbei wird anstatt der Konturüberlappung die Flächenüberlappung mittels 3D-Puffer berechnet und anstatt der Flächenveränderung die Volumenveränderung geschätzt. Außerdem ist ein möglicher Anwendungsbereich dieses Ansatzes nicht nur in der Qualitätsbewertung der Generalisierung beschränkt. Da er speziell für die Schätzung der lokalen Unterschiede zwischen den Grundrissen in großen Maßstäben ausgearbeitet ist, kann es z.B. für die automatische Veränderungsanalyse von flächenhaften Objekten aus den Luft- und Satellitenbilder hoher Auflösung (engl. „change detection“) insbesondere in städtischen Gebieten verwendet werden. Eine weitere Anwendung

besteht in der Genauigkeitsbewertung von Grundrissen von 3D-Gebäudemodellen und 2D-/3D-Innenräumen, welche durch die aus Laser Scanning und alternativen Methoden erhaltenen Punktwolken rekonstruiert werden. Denn gerade im deutschsprachigen Raum erwarten die öffentlichen Auftraggeber eine Übereinstimmung der erzeugten 3D-Gebäude mit den schon vorhandenen Gebäudegrundrissen, wobei meist eine gewisse Toleranzabweichung toleriert wird. Letztendlich kann die Qualität der durch Freiwillige erfasster Geodaten (engl. „crowd sourcing“), welche im Internet allgemein zugänglich sind und in der letzten Zeit eine populäre Erfassungsmethode geworden ist, mit den nach klassischen Methoden erfassten amtlichen Informationen verglichen werden.

Die Schwäche der vorgeschlagenen Charakteristiken besteht darin, dass sie nicht auf Objekte angewendet werden können, die einer affinen Transformation wie Translation oder Rotation unterlegen sind. Diese müssten vor dem Vergleich zuerst kompensiert werden. Wie in der Arbeit gezeigt wurde, kann die Differenz zwischen Schwerpunkt und Orientierung des generalisierten und des originalen Grundrisses, welche auf Basis der zentralen Momenten berechnet werden, bis zu einem bestimmten Grad allein durch die Formveränderung und nicht durch Transformationen bedingt sein. Die für die Berechnung der Orientierung eines Gebäudegrundrisses am besten geeignete Charakteristik basiert auf dem MUR, jedoch gilt diese Aussage häufig nur für rechtwinklige Strukturen. Was die Überlagerung der Grundrisse aufgrund deren Schwerpunkte angeht, sind die dabei entstehenden Überlappungen oftmals nicht optimal und eher unverständlich für einen menschlichen Betrachter. Dementsprechend muss die Frage gestellt werden, nach welchen Charakteristiken die bestmögliche Überlappung von Objekten definiert sein muss und wie diese alternativ zu der Überlagerung der Objektschwerpunkte berechnet werden kann. Eine Lösung zu diesem Problem bietet die Berechnung der Gromov-Hausdorff-Konvergenz, bei der die minimale Hausdorff-Distanz durch Betrachtung aller Möglichkeiten zu isometrischen Transformationen eines Objekts berechnet wird. Hierbei können die Orientierung des MURs und Koordinaten der Scherpunkte als grobe Ausgangsparameter für die Überlappung der Grundrisse verwendet werden, welche danach gemäß dieser Konvergenz optimiert werden müssen.

Aufgrund des durchgeführten Wahrnehmungstests hat sich herausgestellt, dass bei der Qualitätsbewertung der Generalisierungsalternativen durch einen menschlichen Betrachter sowohl die Konturübereinstimmung als auch der Flächeninhalt beachtet werden. Dennoch werden die konturtreuen Generalisierungen mit Abstand bevorzugt, insbesondere wenn der Flächenunterschied nicht sehr groß ist. Außerdem werden die architektonischen Elemente eher in die Generalisierungslösung miteinbezogen als gelöscht, wenn es auch zur Entstehung von relativ großen unausgeglichenen Extrusionsbereichen führen kann. Diese Schlussfolgerungen wurden hauptsächlich aus den einfachen synthetischen Beispielen gezogen und können aufgrund von komplexeren realen Objekten vertieft weiter untersucht werden.

Literaturverzeichnis

- Aksoy, S. and Haralick, R.M., 2001. Feature Normalization and Likelihood-Based Similarity Measures for Image Retrieval. *Pattern Recognition Letters*, 22(5): 563-582.
- Andrae, C., 2009. Spatial Schema: ISO 19107 und ISO 19137 vorgestellt und erklärt. *OpenGIS essentials: Die Geo-Standards von OGC und ISO im Überblick*. Wichmann, Heidelberg, 232 pp.
- Ballard, D.H. and Brown, C.M., 1982. *Computer Vision*. Prentice-Hall, London, 523 pp.
- Bard, S., 2004. Méthode d'évaluation de la qualité de données géographiques généralisées: Application aux données urbaines. *Dissertation Thesis*, L'Université de Paris, Paris, 206 pp.
- Bard, S. and Ruas, A., 2004. Why and How Evaluating Generalised Data?, *Proceedings of the 11th International Symposium on Progress in Spatial Data Handling*. Springer, pp. 327-342.
- Bartsch, R., 2007. *Allgemeine Topologie I*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, Oldenbourg.
- Bauer, W. and Mohl, H.-U., 2005. Das 3D-Stadtmodell der Landeshauptstadt Stuttgart. In: V. Coors and A. Zipf (Editors), *3D-Geoinformationssysteme: Grundlagen und Anwendungen*. Wichmann Verlag, pp. 265-278.
- Bouziani, M., Goïta, K. and He, D.-C., 2010. Automatic Change Detection of Buildings in Urban Environment from Very High Spatial Resolution Images Using Geodatabase Using Prior Knowledge. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(1): 143-153.
- Burger, W. and Burge, M.J., 2006. *Digitale Bildverarbeitung : Eine Einführung mit Java und ImageJ* Springer Berlin Heidelberg.
- Burghardt, D. et al., 2008. Methodologies for the Evaluation of Generalised Data Derived with Commercial Available Generalisation Systems, *11th ICA Workshop on Generalisation and Multiple Representation*, Montpellier (France).
- Burghardt, D., Schmid, S. and Stoter, J., 2007. Investigations on Cartographic Constraint Formalisation, *Workshop of the ICA Commission on Generalisation and Multiple Representation*, Moscow, Russia, pp. 16.
- Camps, T., Kühling, S. and Rosenberger, G., 2006. *Einführung in die mengentheoretische und die algebraische Topologie*. Berliner Studienreihe zur Mathematik, 15. Heldermann Verlag, 528 pp.
- Cheng, T., 2001. Quality Assessment of Model-Oriented Generalization, *4th Workshop on Progress in Automated Map Generalization*, Beijing, China.
- Cormen, T.H., Leiserson, C.E., Rivest, R.L. and Stein, C., 2001. *Introduction to Algorithms*. McGraw-Hill Higher Education.
- Daoud, J.J.A. and Doytsher, Y., 2008. An Automated Cartographic Generalization Process: A Pseudo-Physical Model, *The XXI Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS 2008)*, Beijing, China, pp. 419-424.
- Dettori, G. and Puppo, E., 1998. Designing a library to support model-oriented generalization, *Proceedings of the 6th ACM international symposium on Advances in geographic information systems*. Washington, D.C., United States, pp. 34 - 39
- Devillers, R., Bédard, Y. and Jeansoulin, R., 2005. Multidimensional Management of Geospatial Data Quality Information for its Dynamic Use Within GIS. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 71(2): 205-215.

- Devillers, R., Bédard, Y., Jeansoulin, R. and Moulin, B., 2007. Towards Spatial Data Quality Information Analysis Tools for Experts Assessing the Fitness for Use of Spatial Data. *International Journal of Geographical Information Science*, 21(3-4): 261-282.
- Devillers, R. and Jeansoulin, R., 2006. Spatial Data Quality: Concepts. In: R. Devillers and R. Jeansoulin (Editors), *Fundamentals of Spatial Data Quality*. Geographical Information Systems Series. ISTE Ltd, pp. 31-42.
- DIN PAS 1071, 2007. Qualitätsmodell für die Beschreibung von Geodaten. PAS 1071.
- Duchêne, C. et al., 2003. Quantitative and qualitative description of building orientation, The 5th ICA workshop on progress in automated map generalization, Paris, France, pp. 10.
- Duda, R.O., Hart, P.E. and Stork, D.G., 2001. *Pattern Classification*. Wiley & Sons, 654 pp.
- Eidenberger, H., 2000. Suchmodellbasiertes Content-based Image Retrieval. Ähnlichkeitsdefinition, Anwendung und Automatisierung. Dissertation Thesis, Universität Wien, Wien.
- Eidenberger, H., 2003. Distance Measures for MPEG-7-Based Retrieval, ACM Multimedia Information Retrieval Workshop (at ACM Multimedia Conference), Berkeley, USA, pp. 8.
- Eidenberger, H., 2006. Evaluation and Analysis of Similarity Measures for Content-based Visual Information Retrieval. *ACM Multimedia Systems Journal*, 12(2): 71-87.
- Esbensen, K.H., Guyot, D., Westad, F. and Houmøller, L.P., 2004. *Multivariate data analysis: in practice*. CAMO Process AS, 599 pp.
- Foerster, T., Morales, J. and Stoter, J.E., 2008. A classification of generalization operators formalised in OCL. In: M. Bishr, P. E. and T. Bartoschek (Editors), in *Proceedings of GI-days*, Institute for Geoinformatics, Muenster, pp. 141-156.
- Foerster, T., Stoter, J. and Kraak, M.-J., 2010. Challenges for Automated Generalisation at European Mapping Agencies: A Qualitative and Quantitative Analysis. *The Cartographic Journal*, 47(1): 41-54.
- Forberg, A., 2007. Generalization of 3D Building Data Based on a Scale-Space Approach. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 62(2): 104-111.
- Frank, R. and Ester, M., 2006. A Quantitative Similarity Measure for Maps, *Proceedings of 12th International Symposium. Progress in Spatial Data Handling*. Springer, pp. 435-150.
- Gonzaga, A., Neves, E.M.d.A. and Frere, A.F., 1998. Selective Visual Attention in Object Recognition and Scene Analysis. In: A.G. Tescher (Editor), *Applications of Digital Image Processing XXI SPIE Proceedings*, San Diego, CA, USA pp. 254-264.
- Gonzalez, R.C. and Woods, R.E., 2002. *Digital Image Processing*. Prentice Hall.
- Gould, R., 1988. *Graph theory*. The Benjamin/Cummings Publishing Company.
- Hake, G., Grünreich, D. and Meng, L., 2002. *Kartographie*. Walter de Gruyter Verlag, Berlin, 604 pp.
- Han-Sze-Chuen, D., Mustière, S. and Moulin, B., 2002. Formalising the Geographic Database Generalisation Process by Means of a Conflicts/Operations Graph, *Proceedings of the Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications*, Ottawa, Canada.
- Handels, H., 2009. *Medizinische Bildverarbeitung: Bildanalyse, Mustererkennung und Visualisierung für die Computergestützte Ärztliche Diagnostik und Therapie*. Vieweg + Teubner, Wiesbaden.
- Hangouët, J.-F., 1995. Computation of the Hausdorff Distance Between Plane Vector Polylines, *Proceedings of the International Symposium on Computer-Assisted Cartography Charlotte*, North Carolina, pp. 1-10.

- Hangouët, J.-F., 2006. Spatial Data Quality Assessment and Documentation. In: R. Devillers and R. Jeansoulin (Editors), *Fundamentals of Spatial Data Quality*. Geographical Information Systems Series. *Fundamentals of Spatial Data Quality*, pp. 211-235.
- Harrie, L. and Weibel, R., 2007. Modelling the Overall Process of Generalisation. In: A.M. Williams, R. Anne and L.T. Sarjakoski (Editors), *Generalisation of Geographic Information*. Elsevier Science B.V., Amsterdam, pp. 67-87.
- Hauert, J.-H. and Wolff, A., 2008. Optimal Simplification of Building Ground Plans, The XXI Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS 2008), Beijing, China, pp. 373-378.
- Hauert, J.-H. and Wolff, A., 2010. Optimal and topologically safe simplification of building footprints. In: A.E. Abbadi, D. Agrawal, M. Mokbel and P. Zhang (Editors), *Proceedings of the 18th SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems*. ACM, San Jose, CA, USA, pp. 192-201.
- Henricsson, O. and Baltsavias, E., 1997. 3-D Building Reconstruction with ARUBA: A Qualitative and Quantitative Evaluation. In: A. Gruen, E.P. Baltsavias and O. Henricsson (Editors), *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (II)*. Monte Verita. Birkhäuser, Basel, pp. 65-76.
- Herrlich, H., Hušek, M. and Preuß, G., 2002. Hausdorff-Metriken und Hyperräume, Felix Hausdorff, *Gesamelte Werke: Gründungszüge der Mengenlehre*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 762-766.
- Hild, H., 2003. Automatische Georeferenzierung von Fernerkundungsdaten. Dissertation, Universität Stuttgart. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 562, München 2003, 1315.
- Hu, M.-K., 1962. Visual Pattern Recognition by Moment Invariant. *IRE Transaction on Information Theory*, 8: 179-187.
- ISO 19107, 2003. Geographic Information - Spatial schema.
- ISO 19113, 2002. Geographic information - Quality Principles.
- ISO 19114, 2003. Geographic Information - Quality Evaluation Procedures.
- ISO 19115-2, 2009. Geographic Information - Metadata - Part 2: Extensions for imagery and gridded data.
- ISO 19115, 2003. Geographic Information - Metadata.
- ISO 19115/Cor.1, 2006. Geographic information – Metadata, Technical Corrigendum 1.
- ISO 19137, 2007. Core Profile of the Spatial Schema.
- ISO 19138, 2006. Data Quality Measures.
- ISO/TS 19139, 2007. Geographic Information - Metadata -- XML Schema Implementation
- Jähne, B., 2005. *Digitale Bildverarbeitung* Springer Berlin Heidelberg.
- Jain, A.K., 1989. *Fundamentals of digital image processing*. Prentice Hall information and system sciences series. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- Kada, M., 2007. Scale-Dependent Simplification of 3D Building Models Based on Cell Decomposition and Primitive Instancing, *Proceedings of the International Conference on Spatial Information Theory: COSIT '07*, Melbourne, Australia.
- Kada, M. and McKinley, L., 2009. 3D Building Reconstruction from LIDAR Based on a Cell Decomposition Approach, *Proceedings of the CMRT*, Paris, France.
- Krzanowski, W.J., 2000. *Principles of Multivariate Analysis : a User's Perspective* Oxford Statistical Series. Oxford University Press, Oxford, 586 pp.

- Latecki, L.J. and Lakämper, R., 2000. Shape Similarity Measure Based on Correspondence of Visual Parts. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(10): 1185-1190.
- Latecki, L.J., Lakämper, R. and Wolter, D., 2003. Shape Similarity and Visual Parts. In: I. Nyström, G.S. Baja and S. Svensson (Editors), 11th International Conference on Discrete Geometry for Computer Imagery. Springer, Naples, Italy, pp. 34-51.
- Lechthaler, M., 2007. Hybrid System Design for Cross-Media Publishing in the National Atlas Information System, Proceedings 23d International Cartographic Conference of the International Cartographic Association, Moscow, Russia.
- Lecordix, F. and Lemarié, C., 2007. Managing Generalisation Updates in IGN Map Production. In: A.M. William, R. Anne and L.T. Sarjakoski (Editors), *Generalisation of Geographic Information*. Elsevier Science B.V., Amsterdam, pp. 285-300.
- Leu, J.G., 1991. Computing a Shapes's Moments from Its Boundary. *Pattern Recognition* 24: 949-957.
- Li, Z., 2007. Essential operations and algorithms for geometric transformations in digital map generalization, Proceedings of the XXIII International Cartographic Conference, Moscow, Russia.
- Li, Z., Yan, H., Ai, T. and Chen, J., 2004. Automated Building Generalization Based on Urban Morphology and Gestalt Theory. *International Journal of Geographical Information Science*, 18(5): 513-534.
- Lowe, D.G., 1986. *Perceptual Organization and Visual Recognition*. Robotics: Vision, Manipulation and Sensors. Kluwer Academic Publishers, Boston/Dordrecht/Lancaster, 162 pp.
- Mackaness, W.A. and Ruas, A., 2007. Evaluation in the Map Generalisation Process. In: A.M. William, R. Anne and L.T. Sarjakoski (Editors), *Generalisation of Geographic Information*. Elsevier Science B.V., Amsterdam, pp. 89-111.
- Mayer, H., 2005. Scale-Spaces for Generalization of 3D Buildings. *International Journal of Geographical Information Science*, 19(8-9): 975-997.
- McMaster, R.B. and Shea, K.S., 1992. *Generalization in Digital Cartography*. Resource publications in geography. Association of American Geographers, Washington D.C., 134 pp.
- Mehre, B.M., Kankanhalli, M.S. and Lee, W.F., 1997. Shape Measures for Content Based Image Retrieval: A Comparison. *Information Processing & Management*, 33(3): 319-337.
- Meng, L. and Forberg, A., 2007. 3D Building Generalisation. In: A.M. William, R. Anne and L.T. Sarjakoski (Editors), *Generalisation of Geographic Information*. Elsevier Science B.V., Amsterdam, pp. 211-231.
- Min, D., Zhilin, L. and Xiaoyong, C., 2007. Extended Hausdorff distance for spatial objects in GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 21(4): 459-475.
- Morse, B.S., 2000. *CVonline: On-Line Compendium of Computer Vision* In: R. Fisher (Editor).
- Neun, M., Burghardt, D. and Weibel, R., 2009. Automated processing for map generalization using web services. *GeoInformatica*, 13(4): 425-452.
- Peter, M., Haala, N. and Fritsch, D., 2008. Preserving Ground Plan and Facade Lines for 3D Building Generalization, The XXI Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS 2008), Beijing, China, pp. 481-486.
- Podolskaya, E.S., Anders, K.-H., J.-H. Haunert and Serester, M., 2007. Quality Assessment for Polygon Generalization, 5th International Symposium on Spatial Data Quality (SDQ 2007), ITC, Enschede, The Netherlands.

- Qi, H.B. and Li, Z.L., 2008. An Approach to Building Grouping Based on Hierarchical Constraints, The XXI Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS 2008), Beijing, China, pp. 449-454.
- Querenburg, B.v., 1979. *Mengentheoretische Topologie*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 209 pp.
- Regnault, N. and McMaster, R.B., 2007. A synoptic View of Generalisation Operators. In: A.M. William, R. Anne and L.T. Sarjakoski (Editors), *Generalisation of Geographic Information*. Elsevier Science B.V., Amsterdam, pp. 37-66.
- Salehi, M., Bédard, Y., Mostafavi, M.A. and Brodeur, J., 2007. Towards Specialized Integrity Constraints for Spatial Datacubes, WG II/7, 5th International symposium on Spatial Data Quality (SDQ 2007), Modelling qualities in space and time, Enschede, The Netherlands.
- Samma, A.S.B. and Salam, R.A., 2009. Enhancement of Shape Description and Representation by Slope. *World Academy of Science, Engineering and Technology*(56): 116-120.
- Schlüter, D., 2001. *Hierarchisches Perzeptives Gruppieren mit Integration dualer Bildbeschreibungen*, Bielefeld, pp. 222.
- Sedgewick, R., 1988. *Algorithms*. Computer Science. Addison-Wesley, 659 pp.
- Servigne, S., Lesage, N. and Libourel, T., 2006. Quality Components, Standards, and Metadata. In: R. Devillers and R. Jeansoulin (Editors), *Fundamentals of Spatial Data Quality*. Geographical Information Systems Series. ISTE Ltd, pp. 179-210.
- Sester, M., 2000a. Generalization Based on Least Squares Adjustment, ISPRS, Amsterdam, pp. 931-938.
- Sester, M., 2000b. *Maßstabsabhängige Darstellungen in Digitalen Räumlichen Datenbeständen*. Habilitation, Universität Stuttgart. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 544, München 2001.
- Sonka, M., Hlavac, V. and Boyle, R., 1999. *Image processing, Analysis, and Machine Vision* PWS Publishing.
- Stadler, A. and Lechthaler, M., 2006. Output Media Adapted Cartographic Visualisation, 10th International Conference on Information Visualization (IV'06). IEEE Computer Society, London, pp. 304-309.
- Staufenbiel, W., 1973. *Zur Automation der Generalisierung topographischer Karten mit besonderer Berücksichtigung großmaßstäbiger Gebäudedarstellungen*. Dissertation Thesis, Universität Hannover, Hannover.
- Steffens, T., 2007. *Enhancing Similarity Measures with Imperfect Rule-Based Background Knowledge*. IOS Press, Amsterdam, The Netherlands, 244 pp.
- Steiniger, S., Lange, T., Burghardt, D. and Weibel, R., 2008. An Approach for the Classification of Urban Building Structures Based on Discriminant Analysis Techniques. *Transactions in GIS*, 12(1): 31-59.
- Steiniger, S. and Weibel, R., 2007. Relations among Map Objects in Cartographic Generalization. *Cartography and Geographic Information Science*(34(3)): 175-197.
- Stoter, J. et al., 2009. Methodology for evaluating automated map generalization in commercial software. *Computers, Environment and Urban Systems*, 33(5): 311-324.
- Thiemann, F. and Sester, M., 2006. 3D-Symbolization Using Adaptive Templates, ISPRS Technical Commission II Symposium, Vienna, pp. 109-113.
- Vallières, S., Brodeur, J. and Pilon, D., 2006. Spatial Integrity Constraints: A Tool for Improving the Internal Quality of Spatial Data. In: R. Devillers and R. Jeansoulin (Editors), *Funda-*

- mentals of Spatial Data Quality. Geographical Information Systems Series. Fundamentals of Spatial Data Quality, pp. 161-178.
- Volz, S., 2006. Modellierung und Nutzung von Relationen zwischen Mehrfachrepräsentationen in Geo-Informationssystemen. Dissertation, Universität Stuttgart.
- Voss, K. and Süße, H., 1991. Praktische Bildverarbeitung. Hanser Studienbücher der Informatik. Calr Hanser Verlag, München Wien, 303 pp.
- Wang, G., Forsyth, D.A. and Hoiem, D., 2010. Comparative object similarity for improved recognition with few or no examples, In Proceedings of CVPR, San Francisco, CA, USA pp. 3525-3532.
- Wang, X. and Zhao, R., 2001. A New Method for Image Normalization, Proceedings of 2001 International Symposium on Intelligent Multimedia, Video and Speech Processing, Hong Kong, pp. 356-359.
- Werff, H.M.A.v.d. and Meer, F.D.v.d., 2008. Shape-Based Classification of Spectrally Identical Objects. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 63(2).
- Wolf, M., 1999. Photogrammetric Data Capture and Calculation for 3D City Models. In: D. Fritsch and R.H. Spiller (Editors), Photogrammetric Week, Stuttgart, Germany.
- Xiang, Z., Tinghua, A. and Stoter, J., 2008. The Evaluation of Spatial Distribution Density in Map Generaliaztion, The XXI Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS 2008), Beijing, China, pp. 181-188.
- Xie, H. et al., A New Binary Encoding Algorithm for the Simultaneous Region-based Classification of Hyperspectral Data and Digital Surface Models. Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation, 2011(1): 17-33.
- Yakali, H.H., Dorst, L. and Kröse, B., Pose Characterization by Iindependent Moment-Based Image Features of Planar Objects, RWCP Novel Functions: SNN Laboratory.

Anhang A. Distanz-Funktionen

Distanzfunktionen erlauben den direkten Vergleich zweier Merkmalsvektoren durch Berechnung eines einzelnen Werts.

Zu den meistverwendeten Distanzen gehört z.B. die **Manhattan-Metrik** (engl. „taxicab geometry“ oder „city block“) (Aksoy and Haralick, 2001), die als Summe absoluter Differenzen zwischen den entsprechenden Koordinaten k zweier Merkmalsvektoren i und j , die jeweils aus p Elementen bestehen, berechnet wird:

$$d_{ij}^{Manh} = \sum_{k=1}^p |x_{ik} - x_{jk}| \quad (\text{A.1})$$

Die **euklidische Distanz** ist eine weitere weit verbreitete Funktion, die für die Ähnlichkeitsbestimmung verwendet wird.

$$d_{ij}^{Eucl} = \sqrt{\sum_{k=1}^p (x_{ik} - x_{jk})^2} \quad (\text{A.2})$$

Beide Distanzfunktionen stellen Sonderfälle der **Minkowski-Metrik** dar (Krzanowski, 2000) und werden entsprechend als L_1 -, und L_2 -Distanz oder -Norm bezeichnet.

$$d_{ij}^{Mink} = \left\{ \sum_{k=1}^p |x_{ik} - x_{jk}|^\lambda \right\}^{\frac{1}{\lambda}} \quad (\text{A.3})$$

Für die um einen Ursprung zerstreuten Variablen wird die **Canberra-Metrik** verwendet, die der Manhattan-Distanz ähnelt, wobei die absolute Differenz zwischen den Merkmalswerten durch die Summe dieser Werte geteilt wird.

$$d_{ij}^{Canb} = \sum_{k=1}^p \frac{|x_{ik} - x_{jk}|}{(x_{ik} + x_{jk})} \quad (\text{A.4})$$

Bei der vorhandenen Korrelation zwischen den Elementen zweier Merkmalsvektoren kann die **Mahalanobis-Distanz** eingesetzt werden, die im Unterschied zu der euklidischen Distanz nicht einer sphärischen, sondern einer ellipsoiden Distanzverteilung entspricht:

$$d_{ij}^{Mahal} = \sqrt{(X_i - X_j)' C^{-1} (X_i - X_j)} \quad (\text{A.5})$$

X_i und X_j entsprechen Merkmalsvektoren der Objekte i und j mit Kovarianzmatrix C , deren Elemente die Korrelationen zwischen den Objekteigenschaften darstellen (Eidenberger, 2000).

Anhang B. Geometrische Merkmale

B.1 Formbasierte Charakteristiken

Die Form eines Objekts lässt sich allgemein durch die sogenannten projektiven Merkmale charakterisieren, die auch zur Ähnlichkeitsbestimmung zweier Objekte (komparativer Vergleich) dienen können. Diese Charakteristiken werden durch den Formvergleich zwischen dem Objekt und einer gewählten Basisfigur berechnet, indem das Untersuchungsobjekt auf die Figur projiziert wird. Der Wert der Charakteristik reflektiert, inwieweit die Form beider Objekte ähnlich ist. Der Wert 1 entspricht dabei der vollständigen Übereinstimmung.

B.1.1 Formfaktor

Eine der grundlegenden geometrischen Charakteristiken, die in erster Linie für die morphologische Analyse bzw. Formbeschreibung eines Objekts verwendet wird, ist der sogenannte Formfaktor. Dieser bringt das Verhältnis zwischen dem quadratischen Umfang (U) und dem Flächeninhalt (F) eines Objekts zum Ausdruck und wird in der Literatur zumeist als **Kompaktheit** (engl. „compactness“) bezeichnet (Ballard and Brown, 1982). Häufig wird er durch den Faktor 4π normiert:

$$\text{Kompaktheit} = 4\pi \frac{F}{U^2} \quad (\text{B.1})$$

Laut dieser Charakteristik ist der Kreis die kompakteste Figur. Ein Wert kleiner 1 ist jedoch nicht eindeutig interpretierbar. Sowohl ausgedehnte Formen, als auch kompakte Formen mit konvexen Elementen können zu gleichen Werten führen (vgl. Abbildung B.1 a) und b)).

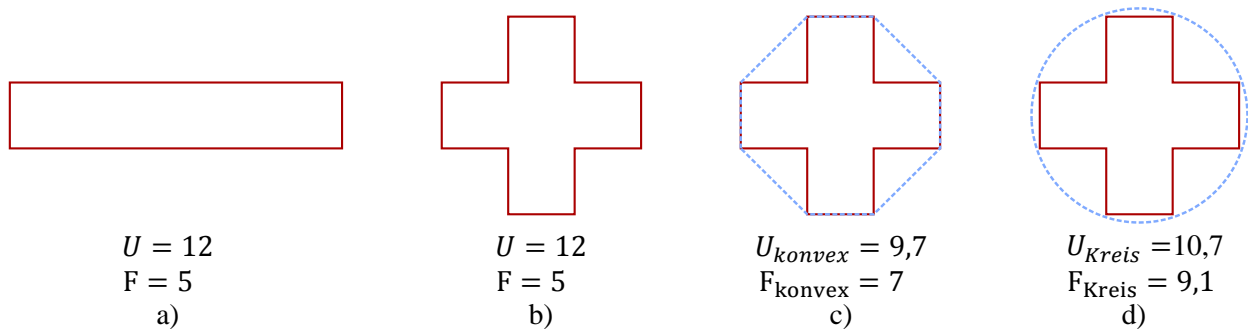


Abbildung B.1: Kompaktheit eines Objekts (in Anlehnung an (Handels, 2009))

Um diese Fälle zu unterscheiden, wird bei der **Kreisförmigkeit** (engl. „compactness“ oder „circularity“) statt dem Umfang des Objekts der Umfang der konvexen Hülle (U_{konvex}) verwendet:

$$\text{Kreisförmigkeit} = 4\pi \frac{F}{U_{\text{konvex}}^2} \quad (\text{B.2})$$

Bei der **Konvexität** (engl. „convexity“) wird schließlich das Vorhandensein konkaver Elemente bzw. lokaler Konturabweichungen eines Objekts im Vergleich zu dessen konvexer Hülle festgestellt:

$$\text{Konvexität} = \frac{U_{\text{konvex}}}{U} \quad (\text{B.3})$$

B.1.2 Füllungsgrad

Der Füllungsgrad (engl. „fill factor“) setzt die Fläche von Vergleichsobjekt mit der Fläche des Referenzobjekts ins Verhältnis. In Abhängigkeit vom Referenzobjekt wird die Bezeichnung weiter spezifiziert.

Die **Rundheit** (engl. „roundness“) vergleicht das Objekt mit der Fläche seines minimal umschließenden Kreises mit Durchmesser D (Handels, 2009):

$$\text{Rundheit} = \frac{4F}{\pi D^2} \quad (\text{B.4})$$

Nach (Bouziani et al., 2010) wird bei der **Ausdehnung** (engl. „elongation“) die Fläche eines Objekts in Bezug auf ein Quadrat mit derselben Seitenlänge wie die des Objekts gesetzt:

$$\text{Ausdehnung} = \frac{F}{[\text{Länge}(\text{Objekt})]^2} \quad (\text{B.5})$$

Eine weitere Variation des Füllungsgrades, die **Konvexität** (engl. „convexity“), stellt das Verhältnis zwischen der Fläche des Objekts und dessen konvexen Hülle dar (Bouziani et al., 2010). In manchen Quellen wird diese Charakteristik auch als Dichte bezeichnet. In diesem Fall wird jedoch der gegenteilige Begriff **Konkavität** (engl. „concavity“) verwendet.

$$\text{Konkavität} = \frac{F}{F_{\text{konvex}}} \quad (\text{B.6})$$

Die **Rechteckigkeit** (engl. „rectangularity“ (Sonka et al., 1999)) ergibt sich aus der Relation der Fläche eines Objekts zur Fläche dessen minimal umschließenden Rechtecks mit der Länge L und Breite B :

$$\text{Rechteckigkeit} = \frac{F}{L \cdot B} \quad (\text{B.7})$$

In (Xie et al.) wird eine Charakteristik unter der Bezeichnung **Rechteckseinpassung** (engl. „rectangular fit“) eingeführt. Dabei wird ein Rechteck verwendet, dessen Zentrum der Schwerpunkt des Objekts darstellt und dessen Fläche gleichgroß wie die Objektfläche ist. Außerdem entspricht das Verhältnis der Länge und Breite des Rechtecks dem Seitenverhältnis des minimal umschließenden Rechtecks dieses Objekts. Basierend auf der Überlappung dieses Rechtecks mit dem Objekt wird die rechteckige Passung berechnet:

$$\text{Rechteckseinpassung} = 1 - \frac{F_0}{F} \quad (\text{B.8})$$

Hier steht F_0 für die durch das Objekt nicht bedeckte Fläche des Rechtecks und F für die Gesamtfläche des Objekts.

B.1.3 Ausdehnung

Die Ausdehnung (engl. „elongation“) eines Objekts wird als Verhältnis zwischen dessen Länge und Breite, welche auch als Hauptachsen oder Hauptrichtungen bezeichnet werden, berechnet und stellt eine gegensätzliche Eigenschaft zur Kompaktheit dar. Ebenso wie beim Füllungsgrad kann sich die Berechnung dieser Eigenschaft auf verschiedene Definitionen beziehen (Ballard and Brown, 1982; Burger and Burge, 2006; Sonka et al., 1999). Dies ist davon abhängig, ob unmittelbar das Objekt oder dessen Approximation in Betracht gezogen wird.

Bei der **maximalen Sehne** (engl. "maximum chord") wird die Länge eines Objekts durch dessen maximale Sehne a festgelegt, die zwei Extrempunkte auf der Objektkontur verbindet. Diese Sehne wird als Hauptachse oder Durchmesser bezeichnet, und dessen Orthogonale b als Breite bzw. Nebenachse (Gonzalez and Woods, 2002).

Da die Berechnung der maximalen orthogonalen Sehnen eines Objekts problematisch sein kann, wird das Objekt oftmals grob durch dessen minimal umschließendes Rechteck (MUR) (engl. „minimum bounding rectangle“) approximiert. Die Charakteristik **Seitenverhältnis** (engl. „aspect ratio“) ist die längere Seite des Rechtecks in Relation zu dessen kürzeren Seite.

Alternativ können die geometrischen Charakteristiken eines Objekts, insbesondere die Ausdehnung bzw. Exzentrizität, aus dessen statistischen Analyse abgeleitet werden. Dabei wird das Objekt deutlich genauer als bei dem MUR durch die **bestpassende Ellipse** (engl. „best fit ellipse“) approximiert.

Ein vergleichendes Beispiel der drei Ausdehnungscharakteristiken gibt Abbildung B.2:

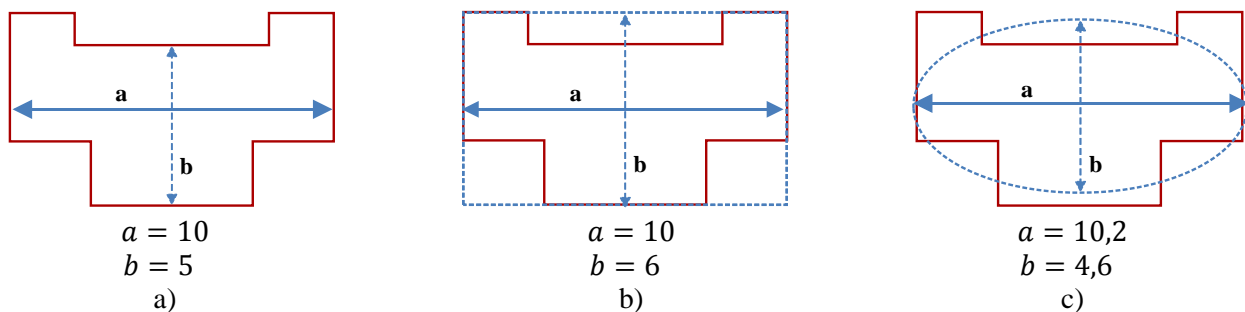


Abbildung B.2: Hauptrichtungen eines Objekts: a) maximale Sehne, b) Seitenverhältnis und c) bestpassende Ellipse

B.2 Statistisch berechnete Merkmale

Wird ein Objekt als Punktverteilung betrachtet, so kann dessen Form auch statistisch beschrieben werden. Eine zentrale Rolle spielt dabei das Konzept der Momente.

B.2.1 Geometrische Momente

Gemäß der stochastischen Betrachtungsweise können die Momente einer Zufallsvariable als numerische Charakteristiken für deren Verteilung definiert werden. Dabei stellt das n -te Moment

bzw. das Moment n -ter Ordnung m_n einer Wahrscheinlichkeitsverteilung X deren Erwartungswert n -ter Potenz dar (Duda et al., 2001):

$$m_n = E(X^n) \quad (\text{B.9})$$

Im multivariaten Fall kann die Verteilung zu den Koordinatenachsen des Merkmalsraums beliebig orientiert sein, wodurch die sogenannten gemischten Momente entstehen, welche die Korrelation zwischen den beiden Variablen ausdrückt. Die Momentordnung o_m einer zweidimensionalen Variablen definiert sich wie folgt:

$$o_m = p + q \quad (\text{B.10})$$

Von den Momenten einer Ordnung gibt es immer zwei, die entlang der Koordinatenachsen berechnet werden, und die gemischten Momente, so dass die Gesamtzahl s für Ordnung m wie folgt bestimmt werden kann:

$$s = o_m + 1 \quad (\text{B.11})$$

Das geometrische Moment $(p + q)$ -ter Ordnung einer zweidimensionalen Zufallsvariable mit kontinuierlicher Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $f(x, y)$ wird gemäß (B.11) geschätzt.

$$m_{pq} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x^p y^q f(x, y) dx dy \quad (\text{B.12})$$

Für die Bildanalyse kann der stochastische Ansatz dadurch angepasst werden, dass an Stelle einer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion die Bildintensität als diskrete charakteristische Funktion bzw. Indikatorfunktion $I_A(x, y)$ angenommen wird.

$$m_{pq} = \sum_x \sum_y x^p y^q I_A(x, y) \quad (\text{B.13})$$

Wird der Abschluss A eines vektoriiellen polygonalen Objekts (z.B. ein Gebäudegrundriss) als eine bivariate kontinuierliche Punktverteilung betrachtet, so kann die Indikatorfunktion insgesamt nur zwei Werte annehmen.

$$I_A(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{falls } (x, y) \in A \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (\text{B.14})$$

Dementsprechend kann das Moment $(p + q)$ -er Ordnung für das Innere eines Objekts wie im folgenden Bereichsintegral berechnet werden:

$$M_{pq} = \iint_A x^p y^q dx dy \quad (\text{B.15})$$

Ist ein Objekt durch die Kontur gegeben, so ist es sinnvoll vom Bereichs- zum Kurvenintegral überzugehen. Dies kann mittels dem Green'schen Integralsatz durchgeführt werden, der die Übereinstimmung zwischen diesen beiden Integraltypen wie folgt feststellt:

$$\iint_A \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right) dx dy = \oint_C (u \partial y + v \partial x) \quad (\text{B.16})$$

Dies führt zu folgender Formel:

$$M_{pq} = -\frac{1}{q+1} \sum_{n=0}^{N-1} (x_{n+1} - x_n) \sum_{k=0}^p \sum_{l=0}^{q+1} \frac{1}{k+l+1} \binom{p}{k} \binom{q+1}{l} (x_{n+1} - x_n)^k (y_{n+1} - y_n)^l x_n^{p-k} y_n^{q+1-l} \quad (\text{B.17})$$

Das Verhältnis der beiden Momente 1-ster Ordnung eines Objekts ergibt die Koordinaten für den Mittelpunkt bzw. Schwerpunkt der Fläche:

$$\bar{x} = \frac{m_{10}}{m_{00}} \quad \bar{y} = \frac{m_{01}}{m_{00}} \quad (\text{B.18})$$

Gerade die Koordinaten des Mittelpunktes eines Objekts stellen eine Basis für die Berechnung der zentralen Momente dar, die unmittelbar zur Beschreibung der geometrischen Eigenschaften eines Objekts verwendet werden.

B.2.2 Zentrale Momente

Räumlich gesehen beziehen sich die geometrischen Momente auf den Ursprung des Koordinatensystems. Eine bessere Aussagekraft bieten jedoch die zentralen Momente, die schwerpunktreduziert sind:

$$\mu_{p,q} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q f(x, y) dx dy \quad (\text{B.19})$$

Das Konzept der zentralen Momente hat eine breite Anwendung in mehreren Wissenschaftsbereichen gefunden. Dabei variieren die Bezeichnungen der auf dieser Basis berechneten Charakteristiken sehr stark, was durch die fachabhängige Interpretation bedingt ist. Die Wesentlichsten davon beziehen sich auf die Statistik und Physik. Im Folgenden wird außerdem die geometrische Bedeutung der zentralen Momente gegeben (Gonzaga et al., 1998; Morse, 2000), welche im Rahmen dieser Arbeit das höchste Interesse darstellt (siehe Tabelle B.1). Die Berechnung von zentralen Momenten für polygonale Vektorobjekte ist im Anhang C beschrieben.

Im Bereich der Bildverarbeitung wird das Konzept der zentralen Momente häufig für die Charakterisierung der geometrischen Eigenschaften eines Objekts genutzt, wobei Begriffe wie Trägheitsmomente und Momententensor (Burger and Burge, 2006; Jähne, 2005) und Kovarianz (Gonzalez and Woods, 2002) Verwendung finden:

$$C = \begin{bmatrix} \mu_{2,0} & \mu_{1,1} \\ \mu_{1,1} & \mu_{0,2} \end{bmatrix} \quad (\text{B.20})$$

Darauf basierend kann die Objektform statistisch durch eine Ellipse approximiert werden, deren Parameter durch die Diagonalisierung der Kovarianzmatrix C geschätzt wird. Auf der Hauptdiagonalen stehen dann die Eigenwerte λ_1 und λ_2 :

$$C = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} \quad (\text{B.21})$$

Moment	Bedeutung		
	Geometrie	Statistik	Physik
(\bar{x}, \bar{y})	Mittelpunkt	Erwartungswert	Schwerpunkt
0-te Ordnung			
$\mu_{0,0}$		Fläche	Gesamtmasse
2-te Ordnung			
$\mu_{2,0}, \mu_{0,2}$	Streuung	Varianz	Trägheitsmomente
	bzgl. x- und y-Achse		
$\mu_{1,1}$	Verteilung nach Quadranten: I-III gegen II-IV	Kovarianz	Kreuzmoment
$\mu_{2,0} + \mu_{0,2}$	Ausdehnung engl. „spread“, „spreadness“		Polarer Trägheitsmoment
3-te Ordnung			
$\mu_{1,2}, \mu_{2,1}$	Horizontale und vertikale Symmetrie bzw. entlang der y- und y-Achse		
$\mu_{3,0}, \mu_{0,3}$	Unausgewogenheit der Position des Schwerpunktes bezüglich der Halbbreite und Halbhöhe des Objekts		
4-te Ordnung			
	Wölbung	Exzess	

Tabelle B.1: Vergleich der fachbezogenen Bezeichnungen der zentralen Momente

B.2.3 Abgeleitete Eigenschaften

Die Diagonalisierung der Kovarianzmatrix entspricht einer Rotation des Koordinatensystems, wobei die Streuung der Objektpunkte in den Hauptrichtungen Extremwerte aufweist.

$$\lambda_{1,2} = \frac{1}{2} \left(\mu_{2,0} + \mu_{0,2} \pm \sqrt{(\mu_{2,0} - \mu_{0,2})^2 + 4\mu_{1,1}^2} \right) \quad (\text{B.22})$$

Diese Eigenwerte sind nichts anderes als die Beträge der Varianzen um den Mittelpunkt der Verteilung herum, die als quadratische Längen der Halbachsen einer Ellipse betrachtet werden können. Dementsprechend beträgt die eigentliche Achsenlänge der Approximationsellipse eines Objekts den Wert $2\sqrt{\lambda_{1,2}}$ (siehe Abbildung B.2 c)).

Der Eigenvektor des maximalen Eigenwertes λ_1 gibt die **Orientierung** eines Objekts an.

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2M_{1,1}}{M_{2,0} - M_{0,2}} \right) + n \left(\frac{\pi}{2} \right) \quad (\text{B.23})$$

Die erste Komponente des Eigenwertes kann als **Ausbreitung** (engl. „spreadness“, „spread“) eines Objekts interpretiert und ähnlich wie die Fläche für die Charakterisierung der Objektgröße verwendet werden (Gonzaga et al., 1998).

$$\text{Ausbreitung} = \mu_{2,0} + \mu_{0,2} \quad (\text{B.24})$$

Zugleich stellt der Betrag des Ortungsvektors den restlichen Teil des Eigenwertes dar und wird auch als **Schlankheit** (engl. „slenderness“) bezeichnet (Hu, 1962; Yakali et al.).

$$|\bar{o}| = \sqrt{(\mu_{2,0} - \mu_{0,2})^2 + 4\mu_{1,1}^2} \quad (\text{B.25})$$

Das Verhältnis zwischen der Fläche des Objekts ($\mu_{0,0}$) und Fläche einer Ellipse mit den Halbachsen a und b wird in der Bildverarbeitung als **Bestrahlungsdichte** innerhalb der Ellipse (engl. „irradiance of the image ellipse“) betrachtet (Wang and Zhao, 2001):

$$\text{Bestrahlungsdichte} = \frac{\mu_{0,0}}{\pi \cdot ab} \quad (\text{B.26})$$

Schließlich spiegelt das Verhältnis des Flächenbetrags eines Objekts ($\mu_{0,0}$) zu dessen Ausbreitung eine alternative Berechnung für die **Kompaktheit** einer Region wider:

$$\text{Kompaktheit} = \frac{\mu_{0,0}}{\mu_{2,0} + \mu_{0,2}} \quad (\text{B.27})$$

Die **numerische Exzentrizität** η lässt sich auch aus den statistisch ermittelten Hauptrichtungen ermitteln (Handels, 2009). Dadurch wird die Abweichung der Form einer Ellipse von der eines Kreises charakterisiert. In (Xie et al.) wird diese Charakteristik auch als Asymmetrie bezeichnet:

$$\eta = 1 - \sqrt{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}} \quad (\text{B.28})$$

Eine weitere Vorgehensweise stammt aus dem Bereich der Bildverarbeitung und besteht darin, die **Exzentrizität** ε als Verhältnis zwischen dem Betrag des Orientierungsvektors und der Spur des Momenten-Tensors zu berechnen (Jähne, 2005):

$$\varepsilon = \frac{(M_{2,0} - M_{0,2})^2 + 4M_{1,1}^2}{(M_{2,0} + M_{0,2})^2} \quad (\text{B.29})$$

Je nach Präferenz kann für die zentralen Momente zweiter Ordnung im Bereich der Bildverarbeitung auch die entsprechende Bezeichnung aus der Physik als Trägheitsmomente verwendet werden (Leu, 1991) und ε wie folgt umgeschrieben werden:

$$\varepsilon = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (\text{B.30})$$

B.3 Distanzen

Der Begriff Distanz stellt das Gegenstück zur Ähnlichkeit dar. Er darf jedoch nicht mit den Distanzfunktionen im Sinne der multivariaten Analyse verwechselt werden, die zwischen den Merkmalsvektoren zweier Objekte berechnet werden und als Aggregation zu betrachten sind. Hier wird unter dem Begriff Distanz der geometrische Abstand gemeint, mit dem Objekte anhand der Kontur oder der Fläche verglichen werden können. Unterschiedliche Distanzen zur Messung des Abstands, insbesondere zwischen polygonalen Objekten, sowie die Diskussion deren Eigenschaften ist bspw. in (Hangouët, 2006; Min et al., 2007; Schlüter, 2001) gegeben.

B.3.1 Hausdorff-Distanz

Eine bedeutende Charakteristik für die Ähnlichkeitsbestimmung zweier Objekte ist die Hausdorff-Distanz, welche den Abstand zwischen zwei abgeschlossenen, beschränkten und nichtleeren Teilmengen im metrischen Raum (Herrlich et al., 2002) misst:

$$d_H(X, Y) = \max \left\{ \sup_{x \in X} \inf_{y \in Y} d(x, y), \sup_{y \in Y} \inf_{x \in X} d(x, y) \right\} \quad (\text{B.31})$$

In der Formel stehen die Bezeichnungen *sup* und *inf* entsprechend für Supremum und Infimum, was die obere und untere Schranke für die Werte einer Teilmenge bedeutet.

Ein wichtiger Punkt besteht dabei darin, dass die Hausdorff-Distanz rein mathematisch formuliert ist und die Berechnung des Abstands zwischen den Objekten ohne hypothetische Zuordnungen der Bestandteile der zwei Objekte ermöglicht. Die Annahme, dass linienhafte und polygonale Objekte als unendliche Punktmengen betrachtet werden können hat die erfolgreiche Übertragung dieser Metrik auch auf den Bereich der Bildverarbeitung und Bildverstehen ermöglicht. Dabei wurde das Anwendungsspektrum der Hausdorff-Distanz deutlich erweitert. Sie wird nicht nur zur Schätzung des Abstands zwischen der räumlichen Position von Nachbarobjekten verwendet, sondern auch für die Bestimmung der geometrischen Ähnlichkeit von Konturen eingesetzt.

B.3.2 Flächenvergleich

Der Unterschied zwischen den polygonalen bzw. flächenhaften Objekten kann auch aufgrund deren räumlichen Erstreckung bzw. der Fläche geschätzt werden. Es können zwei Vorgehensweisen unterschieden werden: quantitativ und raumbezogen. Bei der quantitativen Betrachtung werden lediglich die Flächenbeträge miteinander verglichen und bei der raumbezogenen Betrachtung ein mengentheoretischer Vergleich durchgeführt.

Unter Beachtung der gegenseitigen räumlichen Lage kann der Unterschied zwischen zwei Objekten als **symmetrische Differenz** bzw. Restmenge der beiden Mengen (**A**) und (**B**) bestimmt werden (Bartsch, 2007):

$$A \Delta B = (A \setminus B) \cup (B \setminus A) \quad (\text{B.32})$$

Eine weitere Charakteristik zum Vergleich polygonaler Objekte wird in (Hangouët, 2006) eingeführt. Sie wird als **Flächendistanz** (engl. „areal distance“) bezeichnet und berechnet sich durch das Verhältnis zwischen den nicht überlappenden Teilen zweier Objekte und deren Vereinigungsfläche:

$$\text{Flächendistanz} = \frac{A \Delta B}{A \cup B} \quad (\text{B.33})$$

Beim Formvergleich zum Zweck der Gruppierung von Objekten nach dem Prinzip der Ähnlichkeit wird in (Qi and Li, 2008) die Schnittfläche beider Objekte im Zähler verwendet. Diese Charakteristik wird als **Ähnlichkeitsanteil** (engl. „degree of similarity“) bezeichnet:

$$\text{Ähnlichkeitsanteil} = \frac{A \cap B}{A \cup B} \quad (\text{B.34})$$

Eine ähnliche Formel wird auch in (Bouziani et al., 2010) für den Vergleich der aus hochauflösten Bildern extrahierten Objekte O zu deren Referenzen R verwendet. Darauf basierend kann einerseits die Qualität der Extraktion bewertet und andererseits der **Veränderungsanteil** eines Objekts (engl. „change detection“) identifiziert werden.

$$\text{Veränderungsanteil} = \frac{O \cap R}{R} \quad (\text{B.35})$$

B.4 Funktionaler Vergleich

Mittels der Signatur wird eine zweidimensionale Objektrepräsentation auf eine eindimensionale Funktion reduziert. Eine solche Darstellung soll den Vergleich von Objekten vereinfachen.

B.4.1 Konturbezogene Signaturen

Für die funktionale Repräsentation einer Kontur wird meistens eine polare Projektion verwendet, wobei die Wahl des Projektionspunktes eine Schlüsselrolle spielt. Meist ist es z.B. üblich, die Distanz vom Mittelpunkt des Objekts zu dessen Kontur zu verwenden, die als eine Funktion des Winkels $r(\theta)$ mit $\theta \in [0, 2\pi]$ berechnet wird (siehe Abbildung B.3 a)). Diese Signatur ist auch unter der Bezeichnung polarer Abstand (engl. „radial distance“, „distance vs. angle“) bekannt.

Ein anderes Beispiel einer Signatur stellen Kontur-Normalabstände (engl. „normal contour distance“) dar. Hier wird die Distanz von jedem Punkt auf der Objektkontur A zur gegenüberliegenden Seite (Punkt B) berechnet, so dass die Verbindungslinie senkrecht zu der Konturtangente am Punkt A verläuft (siehe Abbildung B.3 b)).

Die Längen- (r) und Winkelverteilung (θ) aller Kontursehnen (engl. "chord distribution") können auch für die Beschreibung eines Objekts verwendet werden. Im Unterschied zu den Normalabständen stellt eine Sehne eine Linie dar, die zwei beliebige Punkte auf der Objektkontur verbindet (vgl. Abbildung B.3 c)).

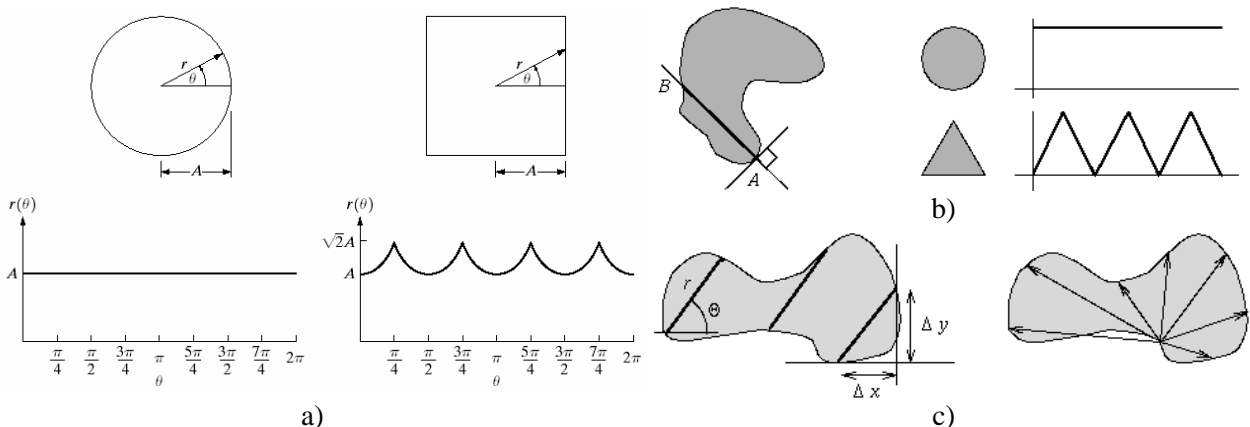


Abbildung B.3: a) Polarer Abstand, b) Normalabstände und c) Sehnenverteilung (aus (Gonzalez and Woods, 2002; Sonka et al., 1999))

Eine der bedeutendsten Signaturen, die für den Objektvergleich eingesetzt wird, ist die Turning-Funktion, die auch als Tangentenfunktion bekannt ist (Gonzalez and Woods, 2002). Sie bringt den Winkel zwischen der Tangente der Objektkontur und einer Referenzlinie an jedem Punkt der Kontur zum Ausdruck (engl. "length vs. slope"). Sie kann auch als eine Schrittfunktion bezeichnet werden, da sie durch sich abwechselnde horizontale und vertikale Segmente repräsentiert ist (Latecki and Lakämper, 2000). Abbildung B.4 zeigt die Turning-Funktion eines Gebäudegrundrisses, dessen Knoten r als der Referenz- bzw. Anfangspunkt für die Turning-Funktion dient:

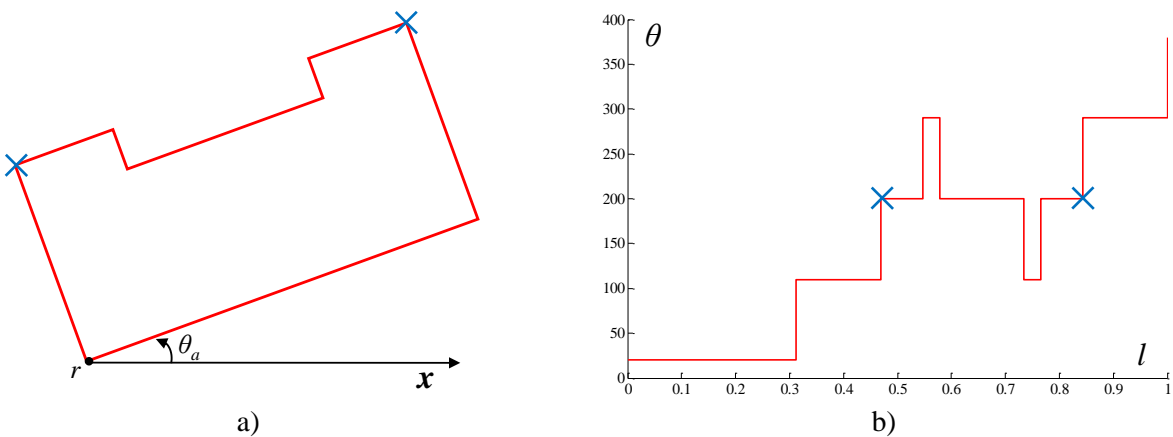


Abbildung B.4: a) Gebäudegrundriss und b) entsprechende Turning-Funktion

Die Krümmungsdichtefunktion (engl. "slope density function") (vgl. Abbildung B.5) ist eine Variation der Turning-Funktion und drückt den Änderungsgrad der Krümmung (engl. "curvature") gemäß dem Verlauf der Objektkontur aus (Gonzalez and Woods, 2002; Sonka et al., 1999).

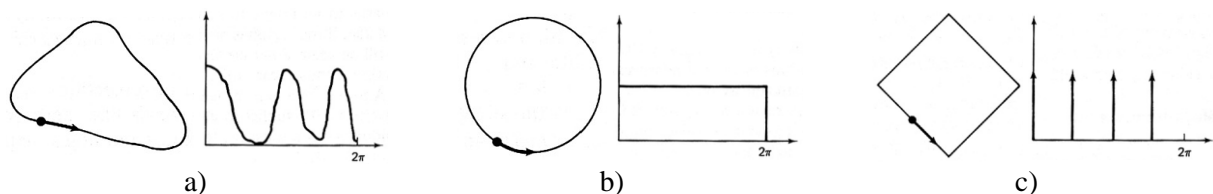


Abbildung B.5: Krümmungsdichtefunktion a) eines beliebigen Objekts, b) eines Kreises und c) eines Quadrats aus (Ballard and Brown, 1982; Burger and Burge, 2006)

B.4.2 Signatur einer Region

Alternativ kann die räumliche Flächenbelegung einer Region durch die y-Achsendarstellung repräsentiert werden. Dabei werden für jeden y-Wert (y-Reihe) die entsprechenden x-Koordinaten des Ein- und Austritts in die Region sukzessiv gespeichert. Auf diese Weise beinhaltet eine solche Darstellung keine explizite Information über den Objektrand (Ballard and Brown, 1982; Burger and Burge, 2006).

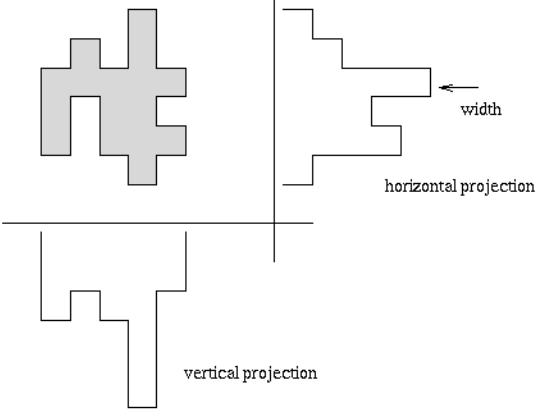


Abbildung B.6: Vertikale (unten) und horizontale (rechts) Projektion eines Objekts (in Anlehnung an (Gonzalez and Woods, 2002; Sonka et al., 1999))

Anhang C. Berechnung von zentralen Momenten

Laut B.17 werden geometrische Momente einer Kontur wie folgt berechnet:

$$M_{pq} = -\frac{1}{q+1} \sum_{n=0}^{N-1} (x_{n+1} - x_n) \sum_{k=0}^p \sum_{l=0}^{q+1} \frac{1}{k+l+1} \binom{p}{k} \binom{q+1}{l} (x_{n+1} - x_n)^k (y_{n+1} - y_n)^l x_n^{p-k} y_n^{q+1-l}$$

Diese Formel kann auch für die direkte Berechnung der zentralen Momente umgewandelt werden. Zu diesem Zweck wird aus jeder Koordinate der Kontureckpunkte, welche in dieser Formel eingesetzt sind, die entsprechende Koordinate des Schwerpunktes subtrahiert. Dabei ist folgendes zu beachten:

$$\begin{aligned} ((x_{n+1} - \bar{x}) - (x_n - \bar{x})) &= x_{n+1} - \bar{x} - x_n + \bar{x} = (x_{n+1} - x_n) \\ ((y_{n+1} - \bar{y}) - (y_n - \bar{y})) &= y_{n+1} - \bar{y} - y_n + \bar{y} = (y_{n+1} - y_n) \end{aligned} \tag{C.1}$$

Hier sind (\bar{x}, \bar{y}) Schwerpunktkoordinaten der betrachteten Kontur, (x_n, y_n) und (x_{n+1}, y_{n+1}) Anfangs- und Endknoten vom n -en Segment, N – Anzahl von Punkten und Segmenten der Kontur.

Darauf basiert nun die endgültige Formel für die direkte Berechnung von zentralen Momenten aus den Knotenkoordinaten einer Kontur (C.2):

$$\begin{aligned} M_{pq} &= -\frac{1}{q+1} \sum_{n=0}^{N-1} (x_{n+1} - x_n) \sum_{k=0}^p \sum_{l=0}^{q+1} \frac{1}{k+l+1} \binom{p}{k} \binom{q+1}{l} \\ &\quad (x_{n+1} - x_n)^k (y_{n+1} - y_n)^l (x_n - \bar{x})^{p-k} (y_n - \bar{y})^{q+1-l} \end{aligned} \tag{C.2}$$

Die zentralen Momente, sowie die abgeleiteten daraus geometrische Eigenschaften der Grundrisse sind im Rahmen der vorliegenden Arbeit aufgrund dieser Formel geschätzt.

Anhang D. Originale und generalisierten Grundrisse mit Nummerierung



Anhang E. Qualitätscharakteristiken der generalisierten Grundrisse

Nr.	Fläche original A(O), m ²	Umfang original P(O), m	Maximale Konturabweichung, m	Anteil der Konturüberlappung, %	Intrusion I(O), %	Extrusion E(O), %	Symmetr. Differenz, %	Flächendifferenz, %
1	251,406	63,909	0,067	100,00	0,13	0,13	0,27	0,00
2	174,646	53,071	0,011	100,00	0,03	0,03	0,06	0,00
3	139,110	49,169	0,383	47,72	2,12	1,79	3,91	0,33
4	203,580	57,192	1,166	54,24	0,81	1,49	2,30	0,68
5	128,869	46,169	1,129	42,49	3,39	3,00	6,39	0,40
6	135,183	46,582	0,011	100,00	0,04	0,04	0,08	0,00
7	43,047	28,437	1,128	65,49	6,69	3,00	9,69	3,68
8	76,259	39,297	3,838	35,09	5,30	24,85	30,16	19,55
9	0	0	0	0	0	0	0	0
10	144,370	48,817	0,007	100,00	0,02	0,03	0,05	0,00
11	132,280	46,055	0,055	100,00	0,18	0,17	0,35	0,00
12	137,462	46,981	0,036	100,00	0,14	0,14	0,28	0,00
13	246,773	62,920	0,026	99,99	0,06	0,06	0,11	0,00
14	146,737	51,039	0,940	45,85	5,08	4,96	10,05	0,12
15	176,080	53,780	0,044	99,98	0,10	0,10	0,19	0,00
16	20,219	17,985	0,022	100,00	0,22	0,23	0,45	0,01
17	131,354	46,497	0,263	88,73	0,57	0,65	1,22	0,08
18	177,843	53,487	0,028	100,00	0,07	0,06	0,13	0,00
19	155,386	50,944	0,786	70,31	1,87	1,65	3,51	0,22
20	129,941	46,331	0,946	72,57	2,26	2,27	4,54	0,01
21	132,641	49,286	0,943	41,45	5,67	5,91	11,57	0,24
22	141,636	48,881	0,651	71,52	2,14	2,12	4,26	0,02
23	0	0	0	0	0	0	0	0
24	119,331	43,736	0,044	100,00	0,11	0,10	0,21	0,01
25	0	0	0	0	0	0	0	0
26	41,203	27,369	0,424	91,60	1,55	1,60	3,15	0,04
27	125,125	47,434	1,285	64,04	3,71	3,69	7,39	0,02
28	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0
30	45,356	26,954	0,036	99,98	0,15	0,15	0,30	0,00
31	0	0	0	0	0	0	0	0
32	120,182	44,396	0,040	99,98	0,14	0,13	0,27	0,01
33	128,805	45,364	0,847	69,15	1,80	2,37	4,17	0,56
34	156,893	50,568	0,016	100,00	0,05	0,05	0,10	0,01
35	199,286	58,125	0,813	69,00	2,95	2,88	5,84	0,07
36	0	0	0	0	0	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0	0	0
38	106,630	40,497	0,855	84,11	0,56	1,71	2,27	1,15
39	133,284	46,773	0,078	100,00	0,23	0,23	0,46	0,00
40	304,651	73,927	0,388	97,92	0,11	0,11	0,22	0,00

41	0	0	0	0	0	0	0	0
42	0	0	0	0	0	0	0	0
43	182,845	55,108	1,163	63,36	3,42	3,90	7,32	0,49
44	128,823	46,085	0,060	100,00	0,19	0,18	0,37	0,00
45	65,177	35,440	3,541	56,88	12,77	18,57	31,35	5,80
46	185,750	57,106	2,243	74,07	5,20	2,06	7,26	3,14
47	306,035	74,422	0,068	99,94	0,14	0,14	0,27	0,00
48	138,362	48,939	1,057	72,26	3,66	3,06	6,72	0,61
49	255,510	63,979	0,004	100,00	0,01	0,01	0,02	0,00
50	134,994	49,618	1,045	64,25	4,45	4,43	8,88	0,02
51	242,688	67,890	0,577	79,89	1,50	1,12	2,61	0,38
52	130,452	47,667	2,418	75,66	9,03	0,10	9,13	8,93
53	139,553	48,846	1,382	48,93	7,41	4,08	11,49	3,33
54	160,939	51,195	0,048	100,00	0,10	0,10	0,20	0,00
55	49,208	32,907	0,056	100,00	0,24	0,25	0,49	0,02
56	120,426	48,638	1,299	27,45	6,82	5,77	12,59	1,05
57	113,206	43,871	0,099	100,00	0,16	0,28	0,44	0,11
58	140,303	49,308	0,968	72,33	3,26	3,24	6,50	0,02
59	131,745	47,653	2,019	76,97	6,97	0,17	7,14	6,79
60	169,042	53,065	0,254	95,92	0,46	0,16	0,63	0,30
61	206,345	58,041	0,066	100,00	0,16	0,17	0,33	0,00
62	124,877	44,812	0,020	100,00	0,05	0,05	0,09	0,00
63	28,604	21,065	1,036	88,96	0,34	4,50	4,84	4,16
64	108,723	44,255	1,162	76,10	3,17	3,16	6,34	0,01
65	170,606	53,216	0,224	96,04	0,33	0,04	0,37	0,29
66	121,087	44,790	0,025	100,00	0,08	0,07	0,14	0,01
67	140,600	46,709	1,116	95,43	0,03	0,92	0,95	0,89
68	189,430	56,705	0,746	70,85	1,48	1,48	2,96	0,00
69	197,256	56,759	0,144	84,29	0,54	0,54	1,07	0,00
70	0	0	0	0	0	0	0	0
71	111,297	44,623	0,974	75,47	3,94	2,83	6,77	1,12
72	217,505	62,380	3,134	39,16	9,08	4,48	13,55	4,60
73	54,733	30,860	0,018	99,99	0,05	0,05	0,10	0,00
74	0	0	0	0	0	0	0	0
75	0	0	0	0	0	0	0	0
76	0	0	0	0	0	0	0	0
77	173,276	52,866	0,059	99,98	0,18	0,17	0,34	0,01
78	222,943	72,249	0,971	52,01	3,35	3,41	6,77	0,06
79	102,944	41,629	1,703	56,28	3,20	4,07	7,27	0,87
80	146,672	51,901	0,126	79,61	0,40	0,64	1,04	0,24
81	0	0	0	0	0	0	0	0
82	29,766	23,322	0,009	100,00	0,07	0,09	0,15	0,02
83	165,569	54,059	3,139	91,96	0,02	4,20	4,22	4,18
84	187,180	55,145	1,002	92,01	0,46	1,01	1,47	0,55
85	135,497	59,608	1,217	57,78	2,73	2,74	5,48	0,01

86	219,547	58,743	0,844	97,25	0,14	0,48	0,62	0,35
87	138,433	50,955	2,575	18,19	8,73	13,69	22,41	4,96
88	63,995	35,232	1,550	86,59	4,33	0,25	4,58	4,08
89	188,809	55,730	0,188	91,96	0,51	0,41	0,92	0,09
90	204,074	57,393	0,030	99,98	0,07	0,07	0,14	0,00
91	182,946	57,010	1,423	42,49	2,94	2,92	5,86	0,03
92	166,279	51,970	1,362	58,20	3,39	3,06	6,45	0,33
93	122,718	46,146	1,155	45,48	4,77	4,66	9,43	0,11
94	201,953	59,715	0,048	100,00	0,08	0,08	0,15	0,00
95	14,386	15,383	0,020	99,99	0,19	0,18	0,38	0,01
96	134,518	46,435	0,067	100,00	0,13	0,14	0,27	0,01
97	24,894	22,156	0,065	100,00	0,54	0,54	1,08	0,00
98	126,175	44,651	1,145	91,98	0,18	1,86	2,04	1,68
99	211,101	58,660	0,382	93,04	0,48	0,49	0,97	0,01
100	264,177	71,602	0,794	90,38	0,03	1,11	1,14	1,08
101	171,421	52,526	0,019	100,00	0,07	0,07	0,14	0,00
102	210,404	57,369	0,949	96,78	0,06	0,50	0,56	0,44
103	88,226	39,931	0,929	93,74	1,42	1,68	3,10	0,26
104	244,760	64,413	0,031	100,00	0,07	0,07	0,14	0,00
105	165,244	52,073	0,341	80,27	0,74	0,64	1,38	0,09
106	153,221	50,712	0,926	59,79	2,63	3,17	5,80	0,54
107	169,398	52,231	0,018	100,00	0,04	0,05	0,09	0,00
108	206,814	57,704	0,224	98,97	0,13	0,13	0,27	0,00
109	120,012	45,443	0,952	49,38	3,78	3,58	7,36	0,20
110	179,655	63,418	0,280	93,46	0,12	0,65	0,77	0,53
111	183,874	55,313	0,021	99,99	0,06	0,05	0,11	0,00
112	206,814	58,945	0,365	53,78	1,50	1,52	3,01	0,02
113	247,925	66,264	1,131	14,38	4,68	4,52	9,21	0,16
114	257,578	67,664	0,973	74,34	2,58	1,82	4,40	0,76
115	204,986	60,490	2,587	19,85	6,72	9,66	16,38	2,95
116	278,732	72,269	0,397	96,01	0,12	0,31	0,43	0,20
117	225,385	59,321	0,964	96,09	0,18	0,58	0,76	0,41
118	152,180	49,627	0,059	99,99	0,19	0,18	0,37	0,01
119	209,240	59,066	0,277	54,40	1,11	1,10	2,21	0,00
120	235,444	65,651	0,685	58,40	0,83	2,46	3,30	1,63
121	161,015	55,294	1,742	54,50	3,23	3,23	6,47	0,00
122	146,817	52,039	1,630	29,27	7,20	6,69	13,89	0,51
123	159,514	54,278	1,547	63,05	5,73	5,73	11,46	0,00
124	246,095	62,391	2,572	80,55	0,54	3,39	3,93	2,84
125	176,081	53,701	0,132	89,94	0,41	0,32	0,73	0,09
126	148,699	52,106	1,300	63,87	4,84	4,83	9,67	0,01
127	174,802	57,409	2,143	27,01	4,05	8,41	12,46	4,36
128	151,550	52,468	2,872	64,52	0,49	9,47	9,96	8,99
129	210,242	58,525	0,462	75,80	1,01	1,04	2,05	0,03
130	96,500	42,376	1,165	88,57	0,19	3,56	3,75	3,38

131	147,503	51,823	1,195	64,10	4,55	4,55	9,11	0,00
132	314,542	76,762	0,205	74,34	0,79	0,36	1,15	0,43
133	119,806	44,295	0,174	90,90	0,20	0,53	0,73	0,33
134	119,062	44,611	2,047	68,06	0,66	6,55	7,21	5,89
135	147,407	50,858	1,337	77,33	0,67	1,66	2,34	0,99
136	130,799	47,794	1,213	94,92	0,12	0,80	0,92	0,67
137	77,073	38,054	1,212	68,72	3,42	6,65	10,06	3,23
138	0	0	0	0	0	0	0	0
139	146,205	52,695	0,758	76,46	1,81	1,66	3,47	0,15
140	187,909	57,341	1,042	77,35	2,09	2,21	4,31	0,12
141	158,812	52,788	2,044	64,05	3,63	3,82	7,45	0,18
142	121,850	44,528	0,038	99,97	0,11	0,09	0,20	0,01
143	0	0	0	0	0	0	0	0
144	84,875	37,461	0,076	100,00	0,25	0,25	0,50	0,00
145	16,669	17,570	0,270	75,90	2,45	2,44	4,90	0,01
146	154,148	52,584	0,530	52,16	1,89	1,55	3,44	0,33
147	0	0	0	0	0	0	0	0
148	162,700	53,342	0,175	94,04	0,01	0,33	0,33	0,32
149	16,791	17,599	0,002	99,97	0,02	0,03	0,05	0,00
150	190,625	55,744	0,068	100,00	0,14	0,15	0,29	0,00
151	16,779	17,585	0,006	100,00	0,05	0,04	0,09	0,00
152	139,585	47,481	0,200	92,43	0,52	0,51	1,03	0,01
153	89,264	39,880	0,091	100,00	0,44	0,43	0,87	0,01
154	8,925	11,835	2,271	66,05	0,00	45,28	45,28	45,28
155	94,520	41,512	1,138	68,99	3,65	5,47	9,12	1,82
156	221,107	62,632	1,174	58,32	3,28	3,32	6,59	0,04
157	0	0	0	0	0	0	0	0
158	0	0	0	0	0	0	0	0
159	0	0	0	0	0	0	0	0
160	284,708	74,205	1,324	20,25	4,89	4,22	9,11	0,67
161	22,044	19,373	0,068	100,00	0,31	0,34	0,66	0,03
162	0	0	0	0	0	0	0	0
163	0	0	0	0	0	0	0	0
164	16,788	17,668	0,061	99,55	0,06	0,03	0,08	0,03
165	237,352	63,646	0,041	99,99	0,10	0,09	0,19	0,01
166	278,637	68,558	0,843	70,62	2,00	1,97	3,97	0,03
167	199,954	63,096	0,162	91,58	0,41	0,09	0,50	0,32
168	140,082	47,624	0,203	92,44	0,70	0,69	1,39	0,01
169	18,740	18,287	3,703	84,72	0,12	19,07	19,19	18,95
170	26,834	29,873	5,694	31,61	57,78	10,48	68,26	47,30
171	0	0	0	0	0	0	0	0
172	16,760	17,576	0,005	100,00	0,05	0,05	0,10	0,01
173	231,122	62,228	2,792	85,58	0,10	5,93	6,03	5,83
174	0	0	0	0	0	0	0	0
175	16,227	17,404	0,007	99,99	0,08	0,07	0,15	0,01

176	627,502	128,618	2,694	59,27	0,05	5,50	5,55	5,45
177	113,237	42,881	0,123	94,02	0,46	0,46	0,92	0,00
178	129,271	47,117	0,737	74,23	3,32	2,32	5,64	1,00
179	170,989	53,319	0,027	100,00	0,13	0,13	0,26	0,00
180	189,495	61,000	0,054	100,00	0,11	0,14	0,25	0,02
181	42,782	27,131	0,025	100,00	0,08	0,09	0,17	0,01
182	229,858	61,729	0,289	72,96	0,91	0,92	1,84	0,01
183	51,691	39,710	0,048	100,00	0,65	0,64	1,29	0,00
184	446,463	93,096	0,011	100,00	0,03	0,02	0,05	0,00
185	131,661	47,458	0,891	74,42	2,78	2,81	5,59	0,04
186	35,912	24,799	0,525	63,87	3,97	4,35	8,32	0,39
187	51,087	33,092	1,399	57,45	10,02	10,52	20,55	0,50
188	190,750	57,997	0,285	91,19	0,63	0,22	0,85	0,41
189	200,121	65,320	1,246	79,56	2,44	3,06	5,50	0,62
190	253,952	75,553	5,149	83,30	0,06	4,79	4,85	4,73
191	204,908	60,505	0,896	65,52	3,85	3,89	7,74	0,03
192	452,712	96,579	0,748	79,01	0,65	0,65	1,31	0,00
193	74,158	42,986	6,666	61,04	30,52	0,01	30,52	30,51
194	200,936	59,742	0,733	66,13	2,89	2,95	5,84	0,07
195	74,694	39,007	5,122	93,70	0,03	8,43	8,46	8,40
196	114,721	42,860	0,012	99,99	0,05	0,05	0,09	0,00

Anhang F. Qualitätscharakteristiken der angepassten Grundrisse

Nr.	Fläche original A(O), m ²	Umfang original P(O), m	Maximale Konturabweichung, m	Anteil der Konturüberlappung, %	Intrusion I(O), %	Extrusion E(O), %	Symmetr. Differenz, %	Flächendifferenz, %
1	251,406	63,909	0,067	100,00	0,13	0,13	0,27	0,00
2	174,646	53,071	0,011	100,00	0,03	0,03	0,06	0,00
3	139,110	49,169	0,598	78,98	1,51	1,77	3,28	0,26
4	203,580	57,192	1,011	76,00	1,44	0,56	2,00	0,87
5	128,869	46,169	1,376	86,79	0,08	3,63	3,71	3,55
6	135,183	46,582	0,011	100,00	0,04	0,04	0,07	0,00
7	43,047	28,437	1,365	68,11	9,71	1,14	10,85	8,56
8	76,259	39,297	4,281	60,45	5,00	25,79	30,79	20,78
9	0,000	0	0,000	0	0	0	0	0
10	144,370	48,817	0,007	100,00	0,03	0,02	0,05	0,00
11	132,280	46,055	0,057	100,00	0,17	0,18	0,35	0,01
12	137,462	46,981	0,035	99,99	0,15	0,13	0,28	0,02
13	246,773	62,92	0,028	99,99	0,06	0,05	0,11	0,01
14	146,737	51,039	1,399	70,91	1,05	7,27	8,32	6,22
15	176,080	53,78	0,043	99,98	0,09	0,10	0,19	0,00
16	20,219	17,985	0,023	100,00	0,24	0,22	0,46	0,02
17	131,354	46,497	0,333	93,76	0,81	0,29	1,10	0,52
18	177,843	53,487	0,028	100,00	0,07	0,06	0,13	0,00
19	155,386	50,944	0,841	86,27	0,03	2,56	2,58	2,53
20	129,941	46,331	1,295	90,73	0,13	3,07	3,20	2,95
21	132,641	49,286	1,560	70,62	9,51	0,13	9,64	9,38
22	141,636	48,881	0,994	87,00	3,24	0,24	3,48	3,01
23	0,000	0	0,000	0	0	0	0	0
24	119,331	43,736	0,043	100,00	0,10	0,10	0,20	0,00
25	0,000	0	0,000	0	0	0	0	0
26	41,203	27,369	0,512	90,93	1,89	0,12	2,01	1,78
27	125,125	47,434	1,659	89,44	0,25	4,75	5,00	4,50
28	0,000	0	0,000	0	0	0	0	0
29	0,000	0	0,000	0	0	0	0	0
30	45,356	26,954	0,038	100,00	0,13	0,17	0,30	0,04
31	0,000	0	0,000	0	0	0	0	0
32	120,182	44,396	0,040	99,99	0,13	0,13	0,27	0,00
33	128,805	45,364	1,026	87,63	0,11	3,02	3,13	2,91
34	156,893	50,568	0,016	100,00	0,05	0,05	0,10	0,00
35	199,286	58,125	1,476	85,24	0,07	5,31	5,37	5,24
36	0,000	0	0,000	0	0	0	0	0
37	0,000	0	0,000	0	0	0	0	0
38	106,630	40,497	0,855	84,12	0,56	1,72	2,28	1,16
39	133,284	46,773	0,076	100,00	0,24	0,22	0,46	0,02
40	304,651	73,927	0,400	97,92	0,02	0,12	0,14	0,10

41	0,000	0	0,000	0	0	0	0	0
42	0,000	0	0,000	0	0	0	0	0
43	182,845	55,108	1,768	82,86	0,12	5,75	5,87	5,63
44	128,823	46,085	0,060	100,00	0,19	0,18	0,37	0,00
45	65,177	35,44	3,541	56,88	12,77	18,57	31,35	5,80
46	185,750	57,106	2,243	74,56	4,81	2,07	6,88	2,74
47	306,035	74,422	0,069	99,93	0,14	0,14	0,27	0,00
48	138,362	48,939	1,699	83,70	5,89	0,26	6,14	5,63
49	255,510	63,979	0,004	100,00	0,01	0,01	0,02	0,00
50	134,994	49,618	1,605	85,80	0,25	6,71	6,97	6,46
51	242,688	67,89	1,046	89,18	0,24	2,07	2,31	1,83
52	130,452	47,667	2,435	75,59	9,15	0,05	9,20	9,10
53	139,553	48,846	2,060	65,78	12,31	0,04	12,35	12,28
54	160,939	51,195	0,046	100,00	0,10	0,10	0,20	0,01
55	49,208	32,907	0,057	100,00	0,24	0,26	0,49	0,02
56	120,426	48,638	1,834	63,98	7,49	2,61	10,11	4,88
57	113,206	43,871	0,092	100,00	0,24	0,19	0,43	0,06
58	140,303	49,308	1,692	83,54	5,75	0,01	5,76	5,74
59	131,745	47,653	2,054	76,81	7,23	0,06	7,29	7,17
60	169,042	53,065	0,230	96,11	0,32	0,35	0,67	0,03
61	206,345	58,041	0,065	100,00	0,17	0,16	0,33	0,01
62	124,877	44,812	0,019	100,00	0,05	0,05	0,09	0,00
63	28,604	21,065	1,055	88,85	0,15	4,72	4,87	4,56
64	108,723	44,255	1,805	89,40	0,07	4,88	4,95	4,81
65	170,606	53,216	0,204	96,27	0,18	0,19	0,37	0,00
66	121,087	44,79	0,026	100,00	0,07	0,07	0,14	0,00
67	140,600	46,709	1,116	95,43	0,03	0,92	0,95	0,89
68	189,430	56,705	0,966	90,60	2,02	0,32	2,33	1,70
69	197,256	56,759	0,144	84,30	0,53	0,54	1,07	0,01
70	0,000	0	0,000	0	0	0	0	0
71	111,297	44,623	1,789	89,01	0,16	5,15	5,31	4,99
72	217,505	62,38	3,134	46,59	8,73	4,92	13,65	3,81
73	54,733	30,86	0,016	99,99	0,04	0,05	0,10	0,01
74	0,000	0	0,000	0	0	0	0	0
75	0,000	0	0,000	0	0	0	0	0
76	0,000	0	0,000	0	0	0	0	0
77	173,276	52,866	0,061	99,97	0,18	0,16	0,35	0,02
78	222,943	72,249	1,306	83,48	1,62	3,34	4,96	1,72
79	102,944	41,629	1,703	71,14	3,70	2,95	6,65	0,75
80	146,672	51,901	0,126	79,62	0,42	0,42	0,84	0,01
81	0,000	0	0,000	0	0	0	0	0
82	29,766	23,322	0,009	100,00	0,07	0,08	0,16	0,01
83	165,569	54,059	3,139	91,96	0,02	4,20	4,22	4,18
84	187,180	55,145	1,002	92,15	0,24	1,15	1,39	0,91
85	135,497	59,608	1,392	90,43	3,25	0,33	3,58	2,92

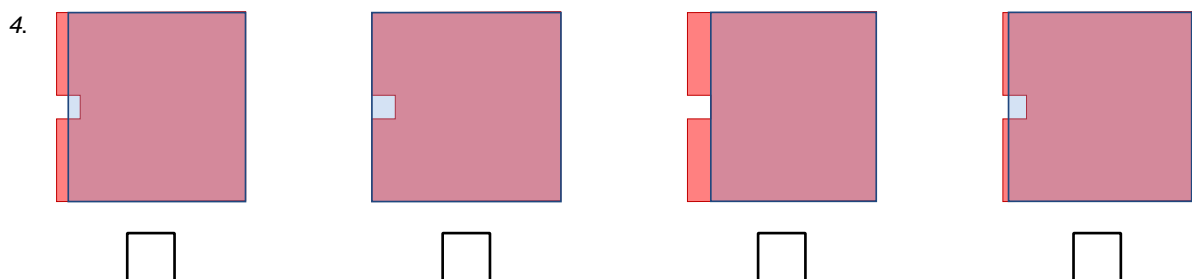
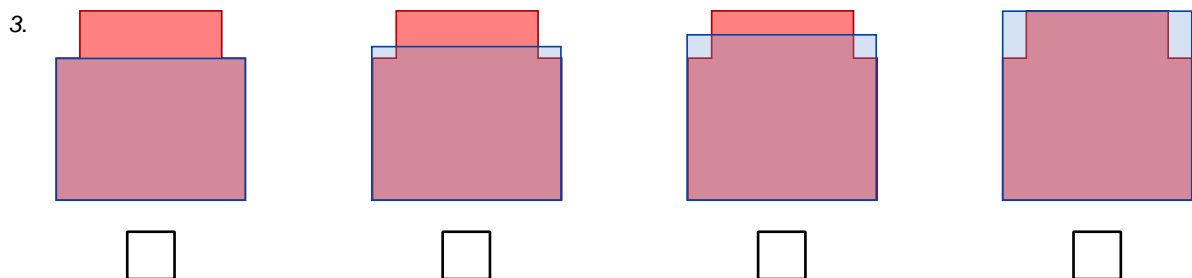
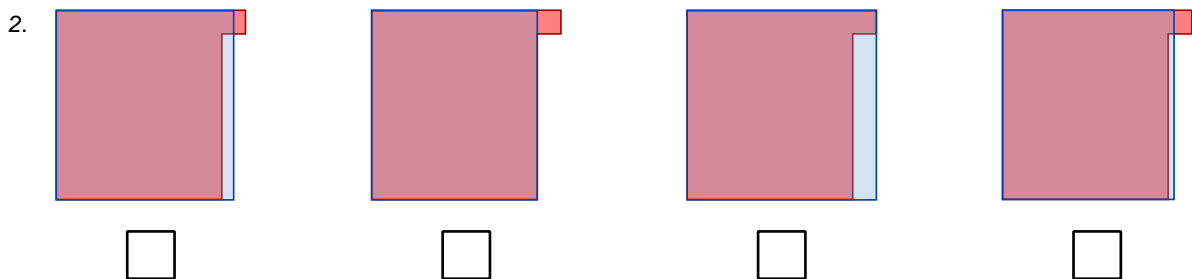
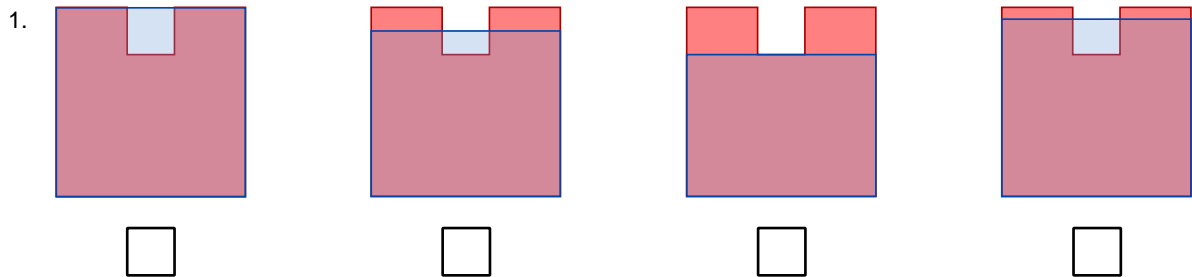
86	219,547	58,743	0,844	97,25	0,14	0,49	0,63	0,35
87	138,433	50,955	4,270	52,60	19,95	1,98	21,94	17,97
88	63,995	35,232	1,550	86,59	4,33	0,25	4,58	4,08
89	188,809	55,73	0,268	92,26	0,07	0,60	0,68	0,53
90	204,074	57,393	0,030	99,99	0,07	0,07	0,14	0,01
91	182,946	57,01	1,653	75,16	0,38	3,85	4,24	3,47
92	166,279	51,97	2,289	64,74	0,49	8,13	8,63	7,64
93	122,718	46,146	1,749	68,39	0,43	7,49	7,92	7,07
94	201,953	59,715	0,048	100,00	0,07	0,08	0,15	0,00
95	14,386	15,383	0,021	100,00	0,18	0,20	0,38	0,03
96	134,518	46,435	0,065	100,00	0,15	0,13	0,28	0,02
97	24,894	22,156	0,066	100,00	0,54	0,55	1,09	0,01
98	126,175	44,651	1,149	91,96	0,17	1,87	2,04	1,70
99	211,101	58,66	0,448	94,84	0,11	0,63	0,74	0,51
100	264,177	71,602	0,709	94,88	0,02	0,63	0,65	0,61
101	171,421	52,526	0,019	100,00	0,07	0,07	0,14	0,00
102	210,404	57,369	0,948	96,78	0,07	0,49	0,56	0,43
103	88,226	39,931	1,053	93,97	0,18	1,95	2,13	1,77
104	244,760	64,413	0,031	100,00	0,07	0,07	0,14	0,00
105	165,244	52,073	0,431	92,56	0,95	0,19	1,14	0,76
106	153,221	50,712	1,227	81,65	0,13	4,13	4,26	3,99
107	169,398	52,231	0,018	100,00	0,04	0,05	0,09	0,01
108	206,814	57,704	0,219	98,97	0,12	0,12	0,25	0,00
109	120,012	45,443	1,638	81,67	0,12	7,00	7,12	6,88
110	179,655	63,418	0,089	100,00	0,17	0,17	0,34	0,01
111	183,874	55,313	0,022	99,99	0,06	0,05	0,11	0,01
112	206,814	58,945	0,574	80,02	2,34	0,20	2,54	2,14
113	247,925	66,264	1,466	47,33	3,04	4,69	7,74	1,65
114	257,578	67,664	1,623	85,32	4,20	0,02	4,22	4,18
115	204,986	60,49	2,587	32,79	3,61	12,23	15,84	8,63
116	278,732	72,269	0,328	98,73	0,03	0,08	0,11	0,05
117	225,385	59,321	0,964	96,09	0,18	0,58	0,76	0,41
118	152,180	49,627	0,059	99,99	0,19	0,18	0,37	0,00
119	209,240	59,066	0,439	79,71	1,83	0,11	1,94	1,72
120	235,444	65,651	0,697	66,96	0,35	2,90	3,26	2,55
121	161,015	55,294	2,108	77,87	3,96	0,52	4,48	3,44
122	146,817	52,039	2,418	72,21	0,18	10,11	10,29	9,92
123	159,514	54,278	2,327	85,23	0,24	8,52	8,77	8,28
124	246,095	62,391	2,579	89,53	0,08	3,56	3,64	3,49
125	176,081	53,701	0,143	91,73	0,36	0,35	0,71	0,01
126	148,699	52,106	1,980	85,50	0,02	7,40	7,42	7,38
127	174,802	57,409	1,677	48,65	3,96	6,82	10,78	2,86
128	151,550	52,468	2,872	75,48	0,05	9,87	9,92	9,82
129	210,242	58,525	0,462	76,17	1,03	1,02	2,06	0,01
130	96,500	42,376	1,167	88,56	0,18	3,58	3,76	3,40

131	147,503	51,823	1,824	85,75	0,04	6,94	6,98	6,89
132	314,542	76,762	0,304	89,96	0,61	0,06	0,67	0,55
133	119,806	44,295	0,133	90,81	0,40	0,40	0,80	0,01
134	119,062	44,611	2,047	68,06	0,65	6,56	7,21	5,90
135	147,407	50,858	1,242	86,46	0,84	1,12	1,95	0,28
136	130,799	47,794	1,213	94,94	0,08	0,81	0,90	0,73
137	77,073	38,054	1,268	72,97	3,78	6,24	10,02	2,46
138	0,000	0	0,000	0	0	0	0	0
139	146,205	52,695	1,157	88,13	2,70	0,07	2,78	2,63
140	187,909	57,341	1,608	90,27	0,06	3,46	3,52	3,40
141	158,812	52,788	2,478	89,65	0,20	4,80	5,00	4,59
142	121,850	44,528	0,035	99,98	0,09	0,11	0,20	0,01
143	0,000	0	0,000	0	0	0	0	0
144	84,875	37,461	0,080	100,00	0,23	0,27	0,50	0,04
145	16,669	17,57	0,271	75,89	2,45	2,45	4,89	0,00
146	154,148	52,584	0,460	77,98	1,29	1,27	2,56	0,02
147	0,000	0	0,000	0	0	0	0	0
148	162,700	53,342	0,034	100,00	0,02	0,03	0,05	0,01
149	16,791	17,599	0,002	99,97	0,02	0,03	0,05	0,00
150	190,625	55,744	0,069	100,00	0,15	0,14	0,29	0,00
151	16,779	17,585	0,006	100,01	0,04	0,05	0,09	0,01
152	139,585	47,481	0,278	92,60	0,07	0,71	0,78	0,64
153	89,264	39,88	0,089	99,98	0,46	0,41	0,87	0,05
154	8,925	11,835	2,271	66,05	0,00	45,28	45,28	45,28
155	94,520	41,512	1,958	83,59	6,30	0,31	6,62	5,99
156	221,107	62,632	1,704	77,67	4,69	0,44	5,13	4,25
157	0,000	0	0,000	0	0	0	0	0
158	0,000	0	0,000	0	0	0	0	0
159	0,000	0	0,000	0	0	0	0	0
160	284,708	74,205	1,983	74,88	4,32	1,83	6,15	2,49
161	22,044	19,373	0,067	100,00	0,33	0,32	0,65	0,01
162	0,000	0	0,000	0	0	0	0	0
163	0,000	0	0,000	0	0	0	0	0
164	16,788	17,668	0,061	99,55	0,06	0,03	0,08	0,03
165	237,352	63,646	0,041	99,99	0,10	0,09	0,19	0,01
166	278,637	68,558	0,967	78,89	1,13	2,59	3,72	1,47
167	199,954	63,096	0,178	97,68	0,11	0,11	0,21	0,00
168	140,082	47,624	0,285	92,62	0,24	0,88	1,12	0,64
169	18,740	18,287	3,712	84,70	0,01	19,17	19,19	19,16
170	26,834	29,873	5,505	39,96	51,40	12,25	63,65	39,16
171	0,000	0	0,000	0	0	0	0	0
172	16,760	17,576	0,005	100,00	0,05	0,05	0,10	0,01
173	231,122	62,228	2,791	85,58	0,11	5,92	6,03	5,81
174	0,000	0	0,000	0	0	0	0	0
175	16,227	17,404	0,007	99,99	0,08	0,07	0,15	0,01

176	627,502	128,618	2,694	77,05	0,28	4,71	4,99	4,43
177	113,237	42,881	0,123	94,07	0,45	0,47	0,92	0,01
178	129,271	47,117	1,413	88,65	0,14	4,35	4,49	4,21
179	170,989	53,319	0,027	100,00	0,13	0,12	0,26	0,01
180	189,495	61	0,018	100,00	0,03	0,03	0,07	0,00
181	42,782	27,131	0,025	99,99	0,09	0,09	0,18	0,00
182	229,858	61,729	0,435	87,13	1,23	0,37	1,60	0,85
183	51,691	39,71	0,046	100,00	0,65	0,65	1,29	0,00
184	446,463	93,096	0,011	100,00	0,03	0,02	0,05	0,00
185	131,661	47,458	1,497	88,17	0,07	4,76	4,83	4,69
186	35,912	24,799	2,893	35,31	48,82	0,00	48,82	48,82
187	51,087	33,092	2,087	81,91	0,25	16,13	16,38	15,88
188	190,750	57,997	0,314	91,22	0,55	0,13	0,68	0,41
189	200,121	65,32	2,065	91,05	4,06	0,07	4,13	3,99
190	253,952	75,553	5,148	83,29	0,07	4,79	4,85	4,72
191	204,908	60,505	1,700	82,26	0,05	7,69	7,74	7,64
192	452,712	96,579	0,844	94,19	0,79	0,06	0,85	0,73
193	74,158	42,986	6,663	61,10	30,48	0,01	30,49	30,46
194	200,936	59,742	1,300	83,49	0,02	5,53	5,55	5,51
195	74,694	39,007	5,122	93,71	0,03	8,44	8,47	8,42
196	114,721	42,86	0,012	99,99	0,05	0,05	0,09	0,00

Anhang G. Wahrnehmungstest

Bewerten Sie die Generalisierungsalternativen mit Bewertung 1 (am besten)
bis 4 (am schlechtesten)



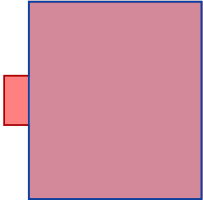
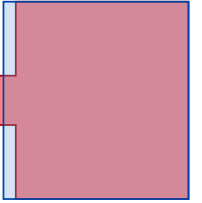
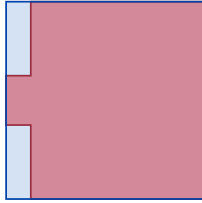
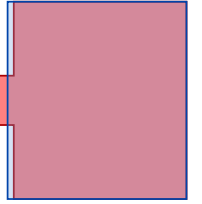
Originaler Grundriss



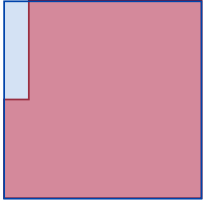
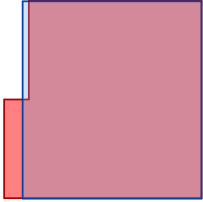
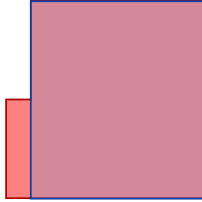
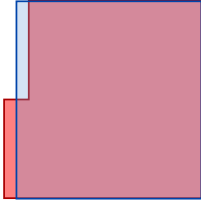
Generalisierter Grundriss

Bewerten Sie die Generalisierungsalternativen mit Bewertung 1 (am besten)
bis 4 bzw. 5 (am schlechtesten)

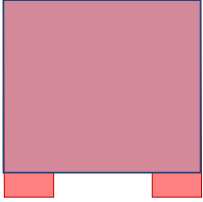
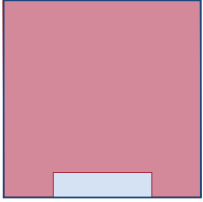
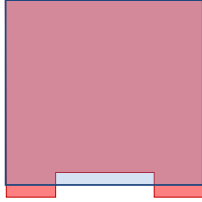
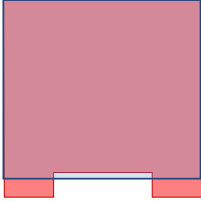
5.

			
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

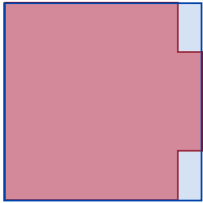
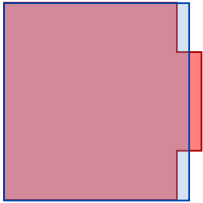
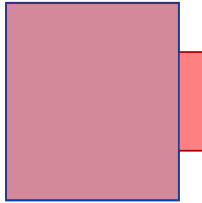
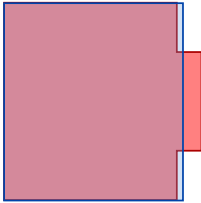
6.

			
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

7.

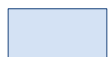
			
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

8.

			
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>



Originaler Grundriss



Generalisierter Grundriss


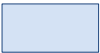
Bewerten Sie die Generalisierungsalternativen mit Bewertung 1 (am besten) bis 4 bzw. 5 (am schlechtesten)

9.

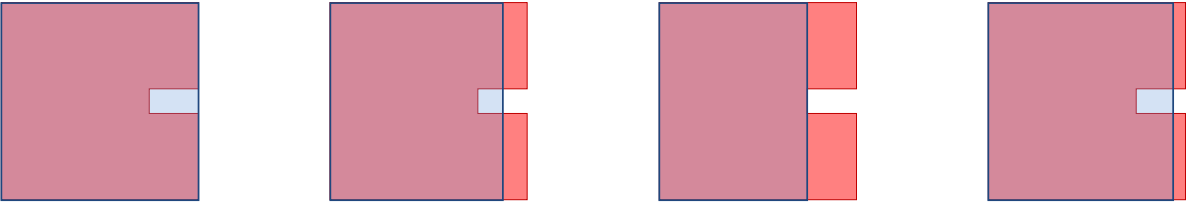
10.

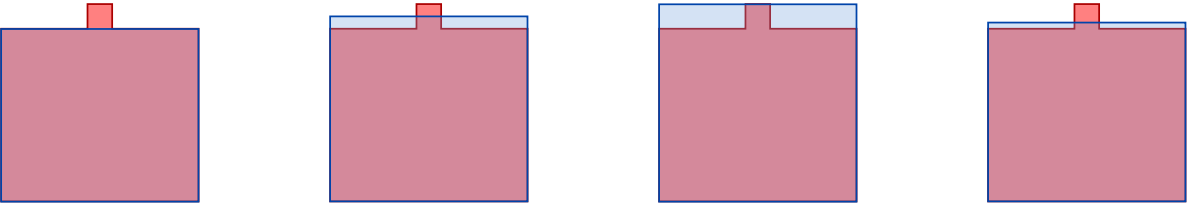
11.

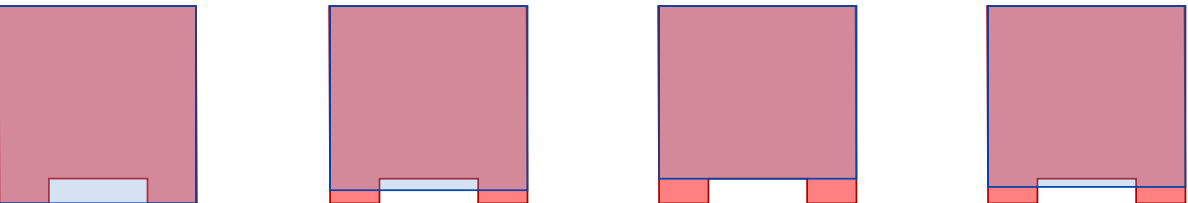
12.

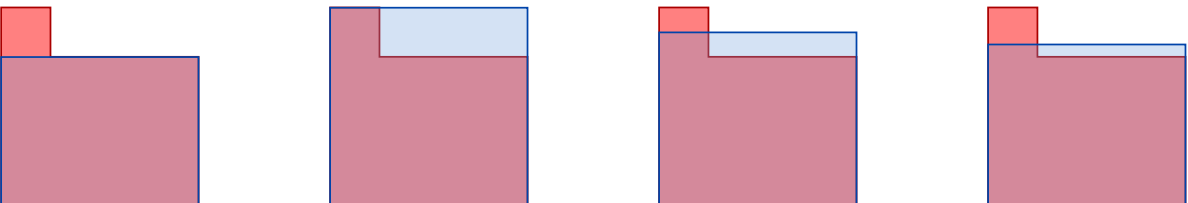
 Originaler Grundriss
 Generalisierter Grundriss

Bewerten Sie die Generalisierungsalternativen mit Bewertung 1 (am besten) bis 4 bzw. 5 (am schlechtesten)

13. 

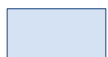
14. 

15. 

16. 



Originaler Grundriss



Generalisierter Grundriss

Bewerten Sie die Generalisierungsalternativen mit Bewertung 1 (am besten) bis 4 bzw. 5 (am schlechtesten)

17.

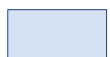
18.

19.

20.



Originaler Grundriss



Generalisierter Grundriss

Bewerten Sie die Generalisierungsalternativen mit Bewertung 1 (am besten)
bis 4 bzw. 5 (am schlechtesten)

21.

Four square floor plan alternatives are shown. Each consists of a red square (Originaler Grundriss) and a blue square (Generalisierter Grundriss) with a small rectangular extension on the top-right side. The extensions vary in position and size across the four alternatives.

22.


Four square floor plan alternatives are shown. Each consists of a red square (Originaler Grundriss) and a blue square (Generalisierter Grundriss) with a rectangular extension on the bottom edge. The extensions vary in position and size across the four alternatives.


23.

Four square floor plan alternatives are shown. Each consists of a red square (Originaler Grundriss) and a blue square (Generalisierter Grundriss) with a rectangular extension on the right edge. The extensions vary in position and size across the four alternatives.

24.

Four square floor plan alternatives are shown. Each consists of a red square (Originaler Grundriss) and a blue square (Generalisierter Grundriss) with a rectangular extension on the left edge. The extensions vary in position and size across the four alternatives.

 Originaler Grundriss

 Generalisierter Grundriss


Bewerten Sie die Generalisierungsalternativen mit Bewertungen 1 (am besten) bis 4 bzw. 5 (am schlechtesten)

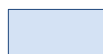
25.

26.

27.

28.

 Originaler Grundriss

 Generalisierter Grundriss



Bewerten Sie die Generalisierungsalternativen mit Bewertung 1 (am besten) bis 4 (am schlechtesten)

29.

30.

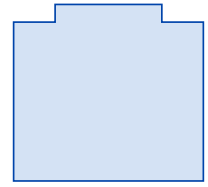
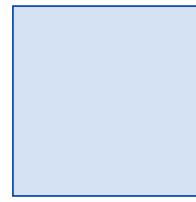
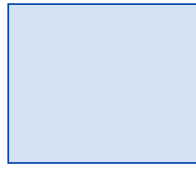
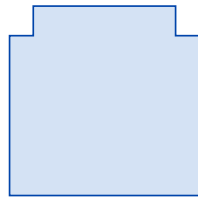
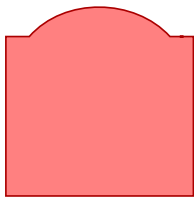
31.

32.

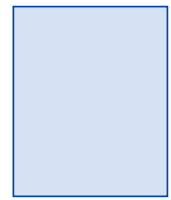
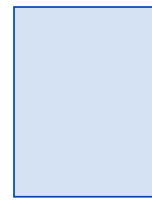
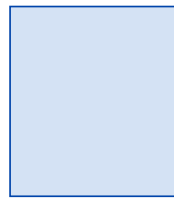
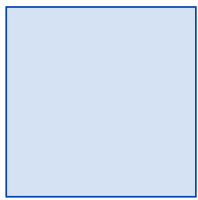
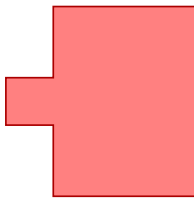
 Originaler Grundriss
 Generalisierter Grundriss

Bewerten Sie die Generalisierungsalternativen mit Bewertung 1 (am besten)
bis 4 (am schlechtesten)

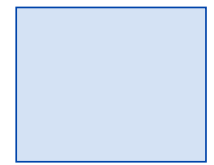
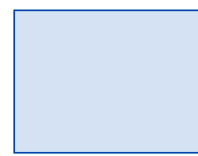
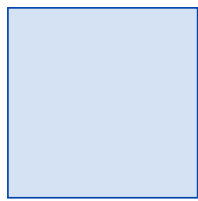
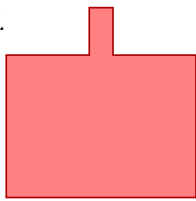
33.



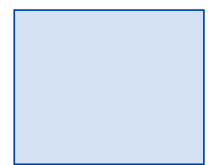
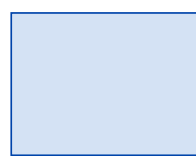
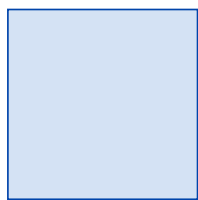
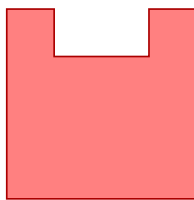
34.

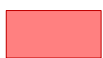


35.



36.





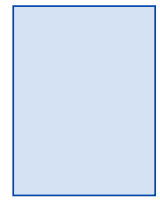
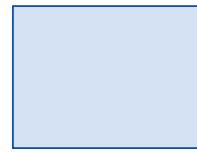
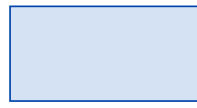
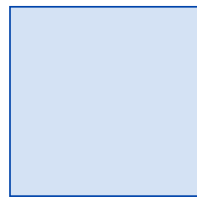
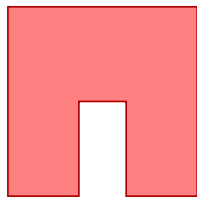
Originaler Grundriss



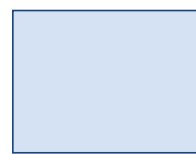
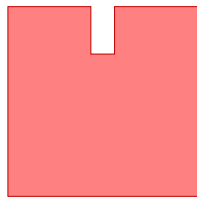
Generalisierter Grundriss

Bewerten Sie die Generalisierungsalternativen mit Bewertung 1 (am besten) bis 4 (am schlechtesten)

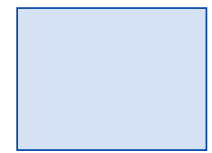
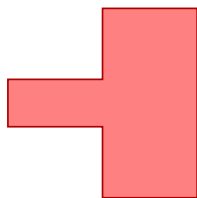
37.



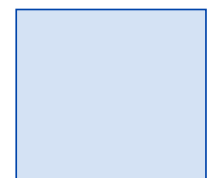
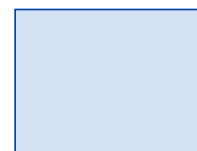
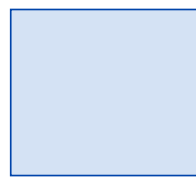
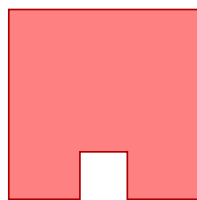
38.



39.

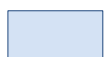


40.



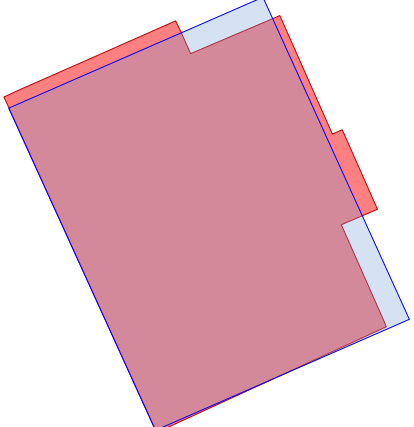
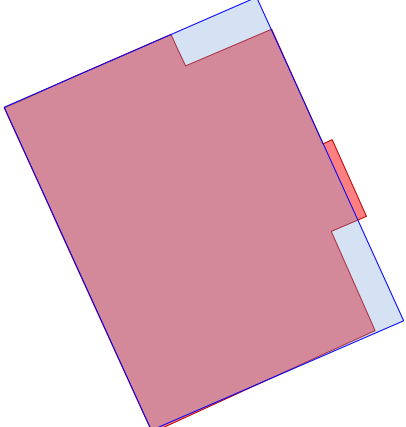
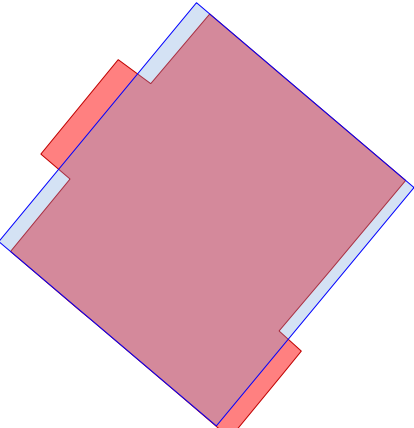
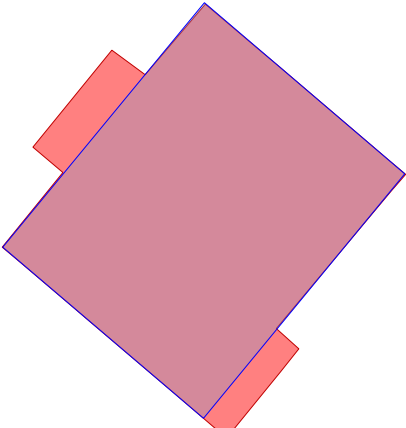
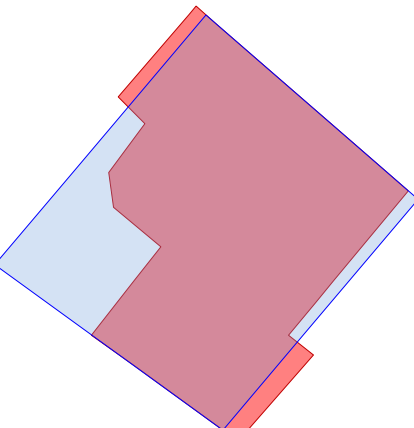
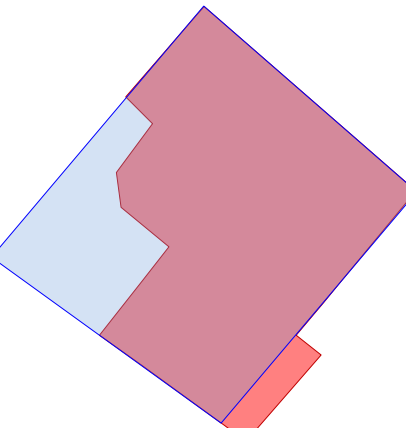


Originaler Grundriss

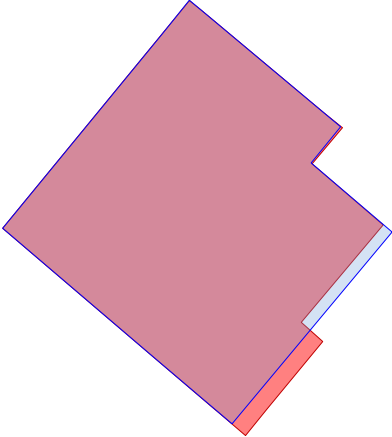
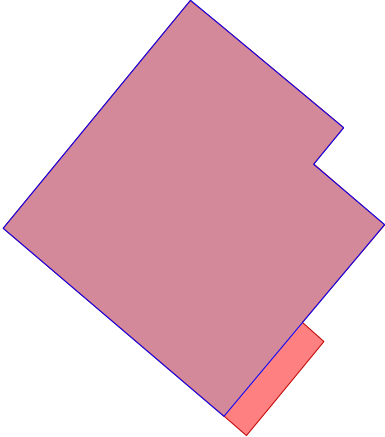
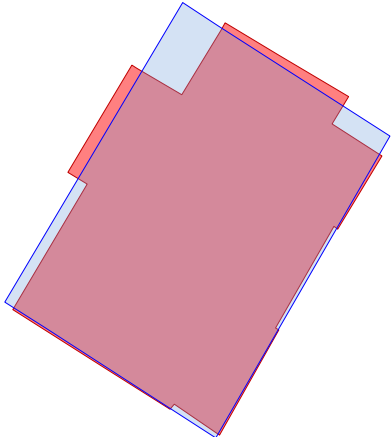
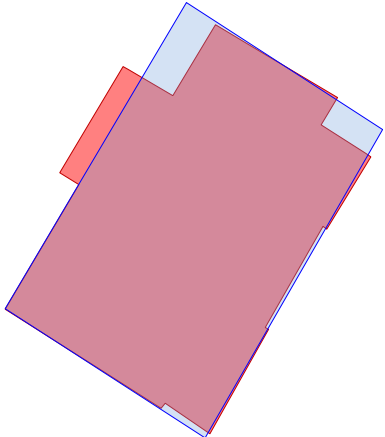
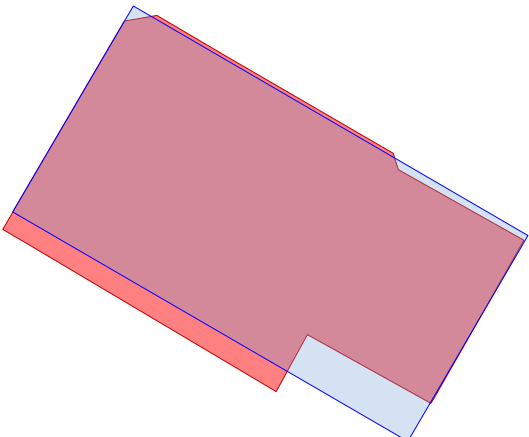
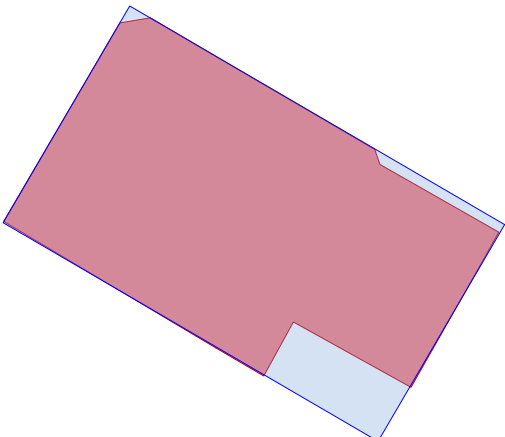


Generalisierter Grundriss

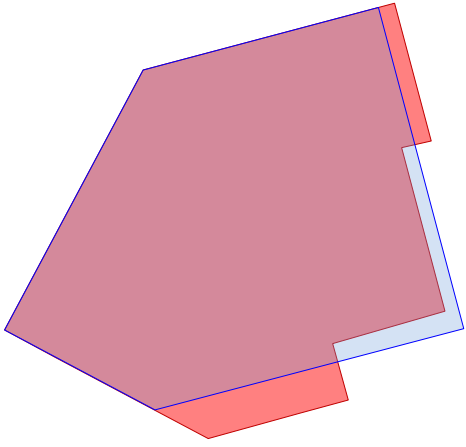
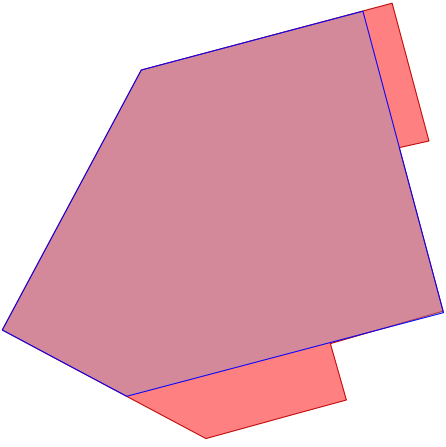
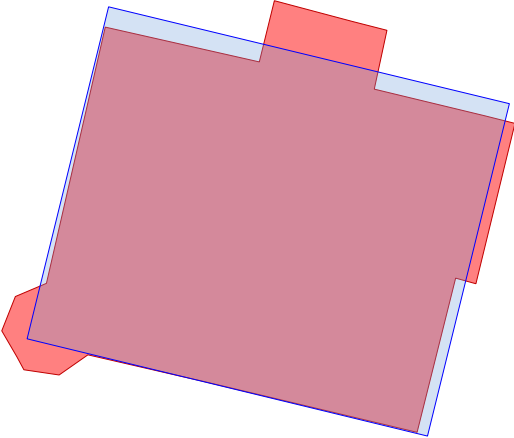
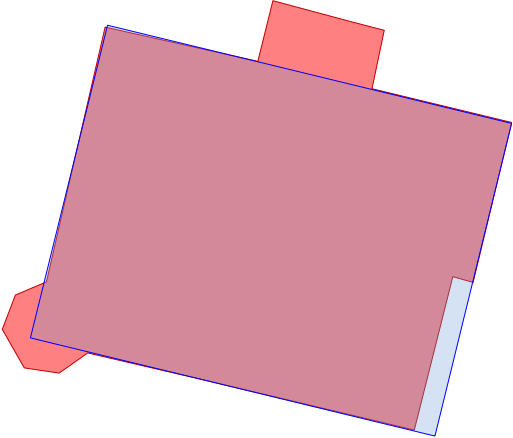
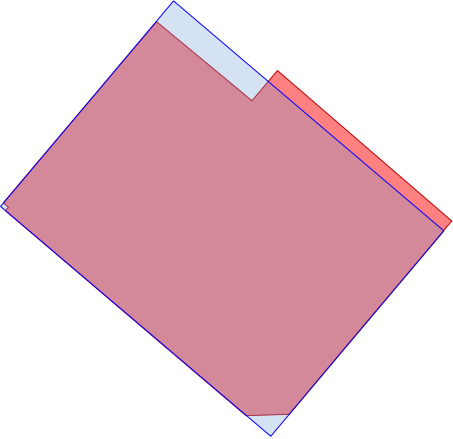
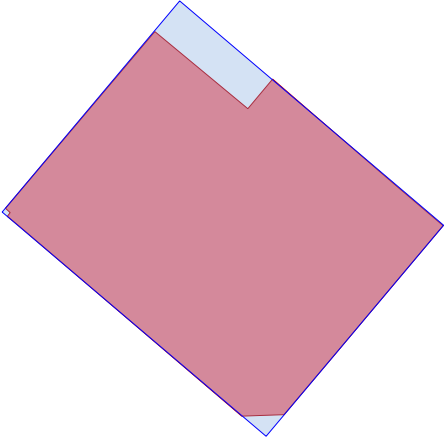
Wählen Sie bessere Generalisierungsalternative
(jeweils links oder rechts ankreuzen)

1		
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2		
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3		
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

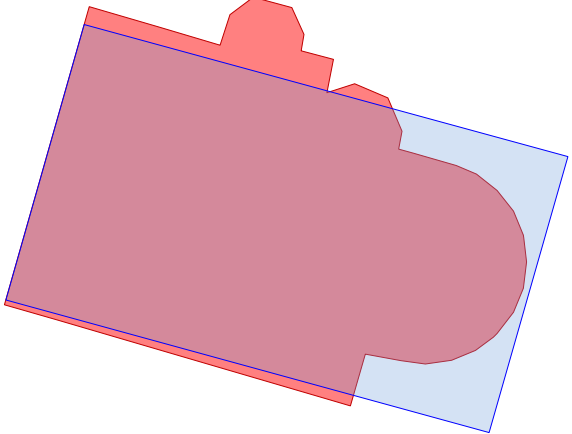
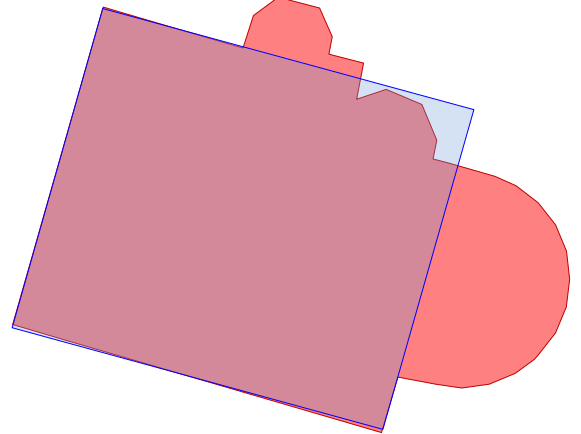
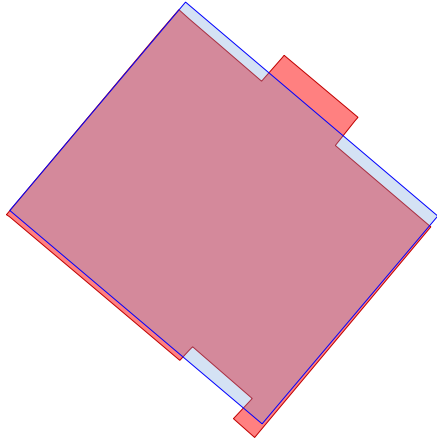
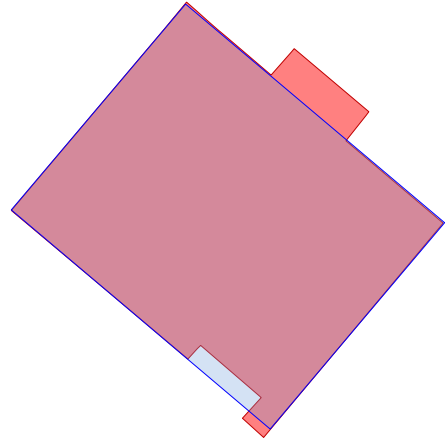
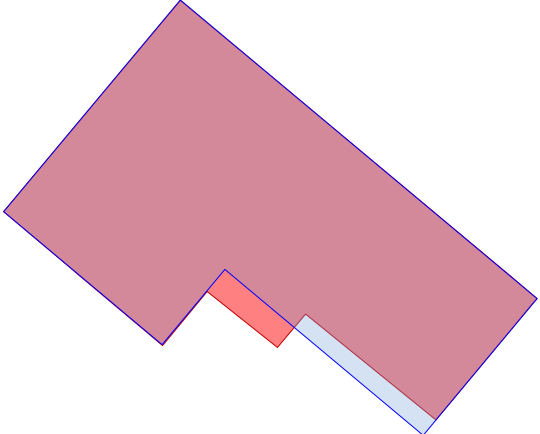
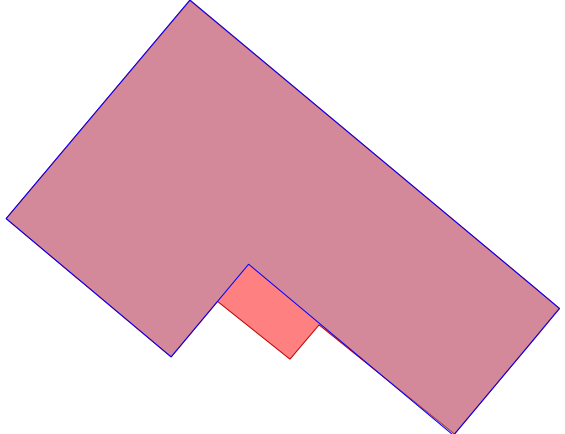
Wählen Sie bessere Generalisierungsalternative
(jeweils links oder rechts ankreuzen)

4		
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5		
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6		
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Wählen Sie bessere Generalisierungsalternative
(jeweils links oder rechts ankreuzen)

7		
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8		
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9		
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Wählen Sie bessere Generalisierungsalternative
(jeweils links oder rechts ankreuzen)

10		
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11		
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12		
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Lebenslauf

Persönliche Angaben

Yevgeniya Filippovska
Geboren am 16. Mai 1983 in Torez, Ukraine

Schulbildung

09.1990 – 06.2000 Allgemeinbildende Profilschule Schule der I-III Stufen # 1 in der Stadt Torez, Gebiet Donezk, Ukraine

Hochschulstudium

09.2000 – 09.2004 Bachelor-Studium im Fach „Geodäsie, Kartographie und Liegenschaft“, Technische Nationale Universität Donezk, Ukraine
10.2004 – 03.2005 Magister-Studium im Fach „Geoinformationssysteme und Technologien“, Technische Nationale Universität Donezk, Ukraine
04.2005 – 04.2006 Gast-Studium im Fach „Immobilientechnik und Immobilienwirtschaft“, Universität Stuttgart
05.2006 – 06.2006 Magister-Studium im Fach „Geoinformationssysteme und Technologien“, Technische Nationale Universität Donezk, Ukraine

Beruf

06.2006 – 10.2006 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Geoinformatik und Geodäsie, Technische Nationale Universität Donezk, Ukraine
02.2007 – 03.2009 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart
04.2009 – 03.2012 Stipendiatin der Landesgraduiertenförderung BW und Doktorandin am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart
Seit 04.2012 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Geoinformatik und Fernerkundung, Universität Osnabrück