

Maßstabsabhängige Darstellungen in digitalen räumlichen Datenbeständen

Monika Sester

Habilitationsschrift
Stuttgart, Mai 2000

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Zusammenfassung | 4 |
| 1 Einleitung und Übersicht | 5 |
| 1.1 Problemstellung | 5 |
| 1.2 Gliederung der Arbeit | 7 |
| 2 Grundlagen | 9 |
| 2.1 Definitionen des Maßstabsbegriffs | 9 |
| 2.2 Formen der Mehrfachrepräsentation | 9 |
| 2.3 Eigenschaften der maßstabsabhängigen Darstellung | 10 |
| 2.4 Warum Generalisierung in GIS ? | 11 |
| 3 Mehrfachrepräsentation in Bildern und Oberflächen | 14 |
| 3.1 Mehrfachrepräsentation in der Bildverarbeitung | 14 |
| 3.1.1 Erzeugung und Repräsentation | 14 |
| 3.1.2 Anwendung von diskreten Pyramiden | 15 |
| 3.1.3 Scale Space – Maßstabsraum | 16 |
| 3.1.4 Anisotropic Diffusion | 18 |
| 3.1.5 Symbolischer Maßstabsraum | 18 |
| 3.1.6 Hierarchische Multispektral-Klassifizierung | 19 |
| 3.2 Ansätze und Lösungen für Oberflächenmodelle | 20 |
| 3.2.1 Erzeugung und Repräsentation | 20 |
| 3.3 Zusammenfassung | 23 |
| 4 Mehrfachrepräsentation in GIS | 25 |
| 4.1 Multiple Repräsentation – maßstabsabhängige Darstellung in GIS | 25 |
| 4.1.1 Integration verschiedener Datenbestände | 25 |
| 4.1.2 Maßstabsabhängige Darstellungen | 26 |
| 4.2 Erzeugung von GIS-Datenbeständen durch direkte Erfassung | 29 |
| 4.3 Erzeugung von GIS-Datenbeständen durch Generalisierung | 32 |
| 4.3.1 Kartographische Generalisierungsoperatoren | 33 |
| 4.3.2 Konzepte für ganzheitliche Lösungen | 38 |
| 4.3.3 Wissenserwerb für die Generalisierung | 40 |
| 4.3.4 Spezielle Ansätze zur integrierten Modellgeneralisierung | 41 |
| 4.4 Hierarchische Datenanalyse | 46 |
| 4.4.1 Fortführung räumlicher Datenbestände | 47 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 5 | Lösungsvorschläge für spezielle Generalisierungsprobleme | 50 |
| 5.1 | Formvereinfachung am Beispiel der Gebäudegeneralisierung | 50 |
| 5.1.1 | Ableiten eines vereinfachten Grundrisses | 50 |
| 5.1.2 | Berechnung eines Modells aus dem vereinfachten Grundriss | 52 |
| 5.1.3 | Ausgleichungsansatz | 52 |
| 5.1.4 | Erweiterung – Least Squares mit Ungleichungen | 56 |
| 5.1.5 | Beispiele für die Anwendung des Algorithmus | 57 |
| 5.1.6 | Bewertung | 61 |
| 5.2 | Verdrängung durch vermittelnde Ausgleichung – das Programm PUSH | 62 |
| 5.2.1 | Ausgleichungsansatz | 63 |
| 5.2.2 | Dimensionierung | 63 |
| 5.2.3 | Aufstellen der Beobachtungsgleichungen | 63 |
| 5.2.4 | Iterative Lösung und Qualitätsmerkmale | 67 |
| 5.2.5 | Parametrisierung | 67 |
| 5.2.6 | Beispiele mit realen Daten | 70 |
| 5.2.7 | Bewertung | 73 |
| 5.3 | Weitere Generalisierungsoperatoren | 75 |
| 5.3.1 | Betonen | 75 |
| 5.3.2 | Aggregation | 76 |
| 5.4 | Typisierung | 76 |
| 5.4.1 | Clusterdetektion und anschließende Verdrängung | 77 |
| 5.4.2 | Selbstorganisierende Karten – Kohohnen Merkmalskarten | 81 |
| 5.5 | Anwendung: Integration von ALK-Gebäuden in einen ATKIS-Datenbestand | 88 |
| 6 | Zusammenfassung und Ausblick | 91 |
| 6.1 | Ausblick auf eine mögliche Integration von GIS und Bildanalyse | 91 |
| 6.2 | Zusammenfassung | 93 |
| A | Optimierungsverfahren | 94 |
| A.1 | Lineare Optimierung | 94 |
| A.2 | Quadratische Optimierung | 95 |
| A.3 | Quadratische Optimierung mit Ungleichungen | 96 |
| | Literaturverzeichnis | 98 |

Zusammenfassung

Ziel der Arbeit ist es, die Bedeutung der Mehrfachrepräsentation (insbesondere der maßstabsabhängigen Darstellung) für digitale raumbezogene Datenbestände hervorzuheben und zu beschreiben. Zunächst wird in einer Übersicht dargestellt, wozu mehrere Repräsentationsformen ein und desselben Objektes genutzt werden können. Ein Fokus liegt dabei auf den maßstabsabhängigen Formen. Prinzipiell geht es dabei darum, die problembezogene Anwendung der Daten zu erleichtern und somit zu beschleunigen. Dies gilt sowohl für die menschliche Wahrnehmung, die sich dieses Prinzip zunutze macht, als auch für computergesteuerte Systeme. Maßstabsbezogene Darstellungen erlauben, dass die Information auf der Auflösungsstufe betrachtet und analysiert wird, die der jeweiligen Aufgabenstellung angemessen ist. Diese Nutzung setzt jedoch voraus, dass die Auflösungsstufen nicht lediglich separat nebeneinander existieren, sondern miteinander verbunden sind. Somit ist gewährleistet, dass der Übergang von einer Stufe auf die nächste immer möglich ist.

Für verschiedene Repräsentationsformen ergeben sich nun unterschiedliche Möglichkeiten der Erzeugung, Verwaltung und Nutzung. Dies wird in der Arbeit anhand der wichtigsten Darstellungsformen räumlicher Objekte ausgeführt, nämlich für Bilddaten, Oberflächen und strukturierte Objekte, wie sie in Geo-Informationssystemen (GIS) vorgehalten werden. Für jede dieser Repräsentationsformen wird separat dargestellt, wie die Datenstrukturen aussehen, welche Möglichkeiten der Erzeugung es gibt, und wie diese Formen für Analyse und Präsentation eingesetzt werden können. Anwendungsbeispiele belegen die verschiedenen Möglichkeiten.

Wichtig ist zu sehen, dass die Repräsentationsformen räumlicher Objekte nicht losgelöst voneinander betrachtet werden müssen, sondern in verschiedenen Fällen sinnvoll kombiniert werden können. Allen voran dienen Bilder der Extraktion von Objekten, die in GIS-Datenbestände eingeführt werden. Umgekehrt können GIS-Daten als Modelle für die Bildanalyse genutzt werden. Diese gegenseitige Nutzung kann jedoch nur erfolgreich sein, wenn die Modelle in den jeweiligen Repräsentationsformen korrespondieren bzw. übertragen werden können. So ist es die Semantik und die Geometrie der Objekte, die ein Modell bestimmen. Seine Repräsentation ist jedoch verschieden, abhängig von Anwendungsgebiet und Auflösungsstufe.

Die Aufgabe der Generalisierung besteht darin, maßstabs- und anwendungsbezogene Modelle abzuleiten. Ihre Automation in GIS setzt voraus, dass elementare Generalisierungsoperatoren vorhanden sind, welche die verschiedenen Problemfälle bearbeiten können. In diesem Zusammenhang werden drei neue Methoden vorgestellt, die für folgende Problemstellungen eingesetzt werden:

- ▷ Gebäudegeneralisierung,
- ▷ Verdrängung,
- ▷ Typisierung.

Während der Algorithmus zur Gebäudegeneralisierung lokal arbeitet, ist der Ansatz zur Verdrängung von globaler Natur: Die Verdrängung behandelt einen gesamten Datenbestand und sucht, alle räumlichen Konflikte zwischen allen Objekten auszugleichen. Voraussetzung ist jedoch, dass lediglich räumliche Konflikte zu lösen sind, und andere Generalisierungsoperationen (wie Selektion) bereits durchgeführt wurden. Das Verfahren erlaubt in seiner momentanen Fassung lediglich kontinuierliche Transformationen des Datenbestandes. Für die Behandlung von Diskontinuitäten sind integrierende Verfahren nötig, welche die Abfolge und die Parameter der verschiedenen, lokal arbeitenden Operatoren steuern. Die vorgestellten Algorithmen stellen aber wichtige Bausteine für ein integriertes Verfahren dar, erlauben sie doch eine Selbstdiagnose, indem sie Maßzahlen über die Qualität des Prozesses liefern.

Abschließend wird skizziert, welche Möglichkeiten die Verfügbarkeit einer integrierten Mehrfachrepräsentation aller räumlichen Datentypen bietet.

1 Einleitung und Übersicht

1.1 Problemstellung

Die Abbildung der Realität führt zu unterschiedlichen Repräsentationen, wobei dies in Abhängigkeit vom aufnehmenden System geschieht. Beim Menschen ist es die Wahrnehmung die steuert, welche Aspekte der Realität registriert bzw. gespeichert werden. Sie basiert auf internen Vorstellungen von der Welt, welche im Laufe des Lebens erworben werden [Neisser 1996]. Dies lässt sich leicht daran ablesen, dass verschiedene Personen Objekte unterschiedlich wahrnehmen und unterschiedliche Eigenschaften als wichtig und damit merkwürdig empfinden. Die internen Vorstellungen hängen von der wahrnehmenden Persönlichkeit selbst, aber auch von Kultur und sozialer Schicht ab. Unterschiedliche Repräsentationen entstehen auch durch unterschiedlichen Kontext.



Abbildung 1.1: *Verschiedene Sichten auf die Realität führen zu unterschiedlichen internen Repräsentationen.*

Diese verschiedenen Repräsentationen haben unterschiedliche Qualitäten: sie können verschiedene Facetten eines Sachverhalts beleuchten oder sie können unterschiedliche Darstellungen räumlicher Objekte sein – auf letzteres erfolgt eine Konzentration in dieser Arbeit. Dies beinhaltet insbesondere die Frage der *maßstabsabhängigen Darstellung*.

Alle räumlichen Phänomene und Prozesse der Erde weisen maßstabsabhängige Komponenten auf. Jeder Prozess, jedes Objekt hat einen bestimmten, *seinen* Maßstab, in dem er/es für eine Aufgabenstellung ideal verstanden und genutzt werden kann. Dies bedeutet, eine einzige Repräsentation eines Objekts reicht in der Regel nicht aus, um alle möglichen Fragestellungen beantworten zu können. Das Sprichwort “den Wald vor lauter Bäumen nicht sehen” ist ein gutes Beispiel hierfür. Auf der Ebene der Bäume – oder noch extremer der Blätter – ist das Konzept eines Waldes nicht unmittelbar ableitbar; umgekehrt gilt dies auch. Dies wird auch durch ein wichtiges Gesetz der Gestalttheorie ausgedrückt: das Gesamte ist mehr als die Summe seiner Teile.

Ein prinzipielles Problem stellen dabei die Übergänge zwischen den Auflösungsstufen dar. Ein Objekt durchläuft im sogenannten Maßstabsraum unterschiedliche Repräsentationen. Verdeutlichen lässt sich das wiederum anhand eines Baumes, der sich im sehr groben Maßstab bzw. aus sehr großer Entfernung nur als etwas längliches Grünes manifestiert. Beim Annähern differenziert man nach und nach Krone und Stamm, weiter werden die Äste in der Krone deutlich, bei stärkerer Annäherung zeigen sich Blätter, die Struktur der Rinde und schließlich auch die Verästelung in den Blättern. Ein Baum als Gesamtobjekt lässt sich also nur im Maßstabsraum fassen – eine einzelne Auflösung fokussiert lediglich auf einige bestimmte Aspekte (Baumhöhe, die Dicke des Stammes, die Größe des Blattes, die Struktur der Verästelung, ...). Die wesentliche Eigenschaft der Mehrfachrepräsentation ist damit die Strukturierung eines Objektes bezüglich verschiedener Sichten. Offensichtlich gibt die grobe Sicht auf eine Informationsquelle einen Überblick hinsichtlich seiner Struktur – während die feine Sicht die Details aufdeckt. Diese Einteilung gilt immer in Bezug auf das betrachtete Objekt (Objektteil): wird ein Blatt als zentrales Objekt betrachtet, so gilt *sein* Maßstab; für den Baum als Gesamtes wird ein kleinerer Maßstab gewählt. Mit kleinerem Maßstab werden die Objekte abstrakter, sowohl geometrisch als auch thematisch.

Der Mensch nutzt diese Eigenschaft ständig und intuitiv in seinem täglichen Leben für die Informationsgewinnung und -vermittlung. Ein deutlicher Beleg ist das menschliche Verhalten, sich Objekten stark zu nähern, um somit seine Details zu erkunden, während er buchstäblich einen Schritt zurücktritt, um die Übersicht zu gewinnen. Mark [1989] stellt fest, dass hierarchisches Planen mit mehreren Detaillierungsstufen für unterschiedliche Teilaufgaben auch ein Grundprinzip menschlicher Wegfindung darstellen.

Grundsätzlich regiert dieses Prinzip in der Informationsvermittlung ganz allgemein, z.B.:

- ▷ Ein Aufsatz wird durch Überschriften, Gliederung, etc. strukturiert.

- ▷ Ein Vortrag bzw. die Kommunikation im allgemeinen wird ebenfalls durch dieses Prinzip gesteuert: zunächst wird der Inhalt grob umrissen, bevor die Details beschrieben werden. Auf diese Weise wird der Inhalt in einen übergeordneten Rahmen eingebettet.

Verschiedene Facetten eines Phänomens werden etwa beleuchtet, wenn man mehrere Bücher zu einem Thema liest, verschiedene Beschreibungen gleicher Sachverhalte (etwa Presseberichte) kennenlernt, oder andere Personen zu einem Sachverhalt um Rat fragt.

Diese Prinzipien gelten für die *Verarbeitung* von Informationen analog. Auch hier werden üblicherweise verschiedene Modelle genutzt und unterschiedliche Sichten auf die Realität erzeugt. Geht es um die Abbildung der physischen Realität, so kann diese in räumlichen Informationssystemen gespeichert werden. Die Daten werden in unterschiedlichen Strukturen abgebildet, welche von Bildern (Luft-, Satelliten-, Multispektralbilder), Karten, Oberflächenmodellen, bis hin zu räumlich strukturierten Datenbeständen reichen. Diese Abbildung kann auch als Interpretationsvorschrift gesehen werden, bei der die Realität mit einem bestimmten Modell 'gefiltert' wird. Dies bewirkt, dass bestimmte Phänomene hervorgehoben und andere unterdrückt bzw. ignoriert werden.

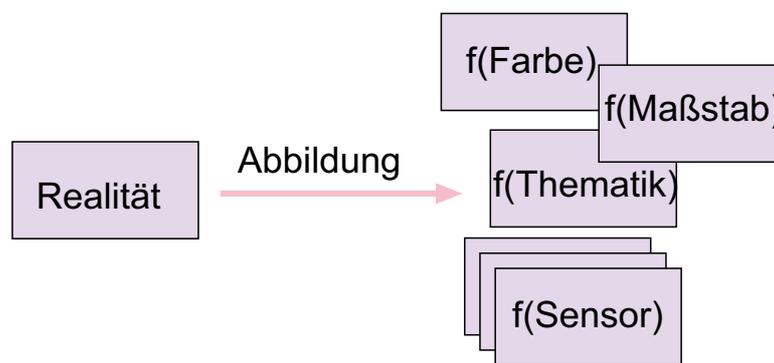


Abbildung 1.2: Abbildung der Realität mittels verschiedener Modelle führt zu unterschiedlichen Repräsentationen.

Jede dieser Repräsentationen hat ihre eigene Qualität, und damit ihre Daseinsberechtigung: Sie wurde mit einem bestimmten Ziel, zu einem bestimmten Zweck erzeugt. Damit existieren mehrere unterschiedliche Sichten auf Objekte, die unterschiedliche Facetten beleuchten, parallel nebeneinander. Sie bereichern das Wissen um die Objekte und sind daher wichtig. In der Summe versuchen sie, das reich strukturierte Gesamtobjekt zu approximieren. Daher ist es wünschenswert, sie gemeinsam verarbeiten zu können, um die Vorzüge und Eigenschaften aller Datenbestände zu nutzen. Hierzu ist eine Integration der Datenbestände in Form expliziter Verbindungen nötig.

Folgende Gründe sprechen für eine Verbindung der Repräsentationen:

1. **Die Repräsentationen beinhalten überlappende Thematik:** Durch Integration von Repräsentationen unterschiedlicher Thematik (bezogen auf gleiche Phänomene der Realität) können die Vorteile und Eigenschaften beider Datensätze genutzt werden. Sind die Objekte einander zugeordnet, so können ihre Attribute ausgetauscht werden. Dies kann z.B. zur sogenannte Fachdatenintegration genutzt werden, aber auch für das Zusammenführen von Bildern und GIS-Daten.
2. **Zwischen zwei Darstellungen bestehen lediglich Maßstabsunterschiede:** eine Verbindung zwischen den Datenbeständen öffnet zunächst die Möglichkeit, die Aktualisierung der Daten in einem Datensatz durchzuführen (dem genaueren, größeren Maßstab), und diese anschließend in den kleineren Maßstab zu propagieren. Damit wird auch das Problem der Inkonsistenz und der fehlenden Integrität unterschiedlicher Datenbestände umgangen.

Geht man davon aus, dass die Verbindung zwischen den Datenbeständen in Form von Ableitungsregeln gestaltet ist (und nicht lediglich als bloße Verbindungen), so ist das Anwendungspotential noch bedeutend höher: damit wird es prinzipiell möglich, den kleinmaßstäbigen Datenbestand komplett automatisch aus dem Detaillierteren zu erzeugen. Die Verbindungen können sowohl individuell (objektspezifisch) sein, als auch generisch (etwa in Form von Regeln).

- 3. Automatische Datenanalyse:** Liegen die Verbindungen vor, so ist es möglich, die Daten automatisch zu analysieren. Von besonderer Bedeutung sind hierbei die hierarchischen Verfahren, welche den Problemraum einschränken, und somit die Lösungssuche beschleunigen können. Oft ergibt sich eine Lösung auch erst durch die Integration verschiedener Maßstäbe.

Damit ist ein Objekt nicht nur in seinen thematischen und geometrischen Kontext eingebettet, sondern auch noch bezüglich des Maßstabs hierarchisch untergliedert. Dabei müssen die Zusammenhänge kontinuierlich sein, d.h. es dürfen keine großen Sprünge auftreten, die nicht mehr nachvollziehbar sind.

Bezüglich der Mehrfachrepräsentation leiten sich nun drei wesentliche Problemstellungen ab:

Repräsentation: Es muss ein Repräsentationsschema bereitgestellt werden, welches erlaubt, dass Objekte mehrere geometrische und semantische Ausprägungen annehmen können. Weiterhin muss es die Integration verschiedener Datensätze unterstützen.

Generierung der Verbindungen: Die Verbindungen zwischen den Datenbeständen müssen modelliert werden. Dies ist zum einen als bloßer gegenseitiger Verweis möglich, zum anderen in Form einer Ableitungsvorschrift.

Nutzen für Datenanalyse und Präsentation: Effiziente Analysemethoden müssen bereitgestellt werden, welche dieses multiple Repräsentationsschema nutzen können. Gleiches gilt für Visualisierungsmethoden.

Diese Fragen werden in der Arbeit diskutiert. Es erfolgt jedoch ein Schwerpunkt auf dem zweiten Punkt, der Frage der Generierung der Verbindungen. Im Falle der Verbindung gleichmaßstäbiger Datensätze handelt es sich um ein Zuordnungs- bzw. Interpretationsproblem, während verschiedene Maßstäbe primär durch Generalisierungsmechanismen verbunden werden müssen. Dieses Problem wird in der Kartographie und Geoinformatik unter dem Stichwort 'multi-scale representation' behandelt, und gehört somit zum Bereich 'multiple representation'.

Diese Probleme sind für jeden räumlichen Datenbestand zu klären. Allerdings existieren für sie jeweils unterschiedliche Lösungen, die zudem in den unterschiedlichen Datenstrukturen von unterschiedlicher Komplexität sind. Die verschiedenen Aspekte der Mehrfachrepräsentation werden bezüglich folgender räumlicher Datentypen dargestellt:

- ▷ Mehrfachrepräsentation in der Bildanalyse,
- ▷ Mehrfachrepräsentation bezüglich Oberflächenmodellen,
- ▷ Mehrfachrepräsentation in GIS.

Auf diese Weise können Ähnlichkeiten zwischen den Prozessen aufgedeckt werden, welche die Grundlage bilden können, die unterschiedlichen Konzepte zu übertragen. Auch eröffnet sich damit prinzipiell die Möglichkeit, die verschiedenen Repräsentationsformen zusammenzuführen und gemeinsam zu nutzen. Insbesondere ist dies für die Integration von Bild- und GIS-Daten von großer Bedeutung.

1.2 Gliederung der Arbeit

Im Zentrum der Arbeit steht die maßstabsabhängige Darstellung raumbezogener Information. Dabei erfolgt eine Konzentration auf strukturierte Geodaten, wie sie in Geo-Informationssystemen (GIS) abgelegt werden. Der Kontext der Mehrfachrepräsentation und damit der Integration verschiedener räumlicher Datenbestände wurde in der Einleitung angerissen.

Die Eigenschaften und Vorteile von maßstabsabhängigen Darstellungen werden in Kapitel 2 beschrieben. Dabei wird besonders auf die Frage fokussiert, warum diese auch in GIS benötigt werden. Solche Darstellungen werden für andere raumbezogene Datentypen ebenfalls genutzt. Daher wird in Kapitel 3 beschrieben, wie sie für verschiedene Datentypen aussehen und für Analyse und Visualisierung eingesetzt werden können. Dies wird für die Bereiche Bilddaten und Oberflächen untersucht und anhand von Beispielen belegt.

Der Schwerpunkt der Arbeit liegt in der Behandlung von strukturierten Geodaten, daher erfolgt eine detaillierte Darstellung der derzeitigen Möglichkeiten automatischer Generalisierung in Kapitel 4. Gleichzeitig wird dargelegt, wie solche Strukturen für Analyse und Präsentationen eingesetzt werden. Dabei wird der Bogen gespannt von der bloßen Präsentation der Daten über Analysemöglichkeiten bis hin zur komplexen Integration unterschiedlicher Datenbestände – einer wirklichen Mehrfachrepräsentation.

Schließlich werden in Kapitel 5 drei neue Verfahren vorgestellt, welche Einzelprobleme der Generalisierung zu lösen vermögen. Dabei handelt es sich um einen Ansatz zur Gebäudegeneralisierung, einen globalen Ansatz zur Verdrängung, und ein Verfahren zur Typisierung. Diese Verfahren sind als Bausteine zu sehen, auf dem Weg zur Integration in komplexe Generalisierung- und Interpretationsmethoden. Wenngleich dieses Ziel noch in weiter Ferne zu sein scheint, zeichnet sich gegenwärtig eine Tendenz ab, die Methoden zur Behandlung raumbezogener Daten zu integrieren und zusammenzuführen. Im abschließenden Kapitel 6 wird daher ein Ausblick auf die Möglichkeiten gegeben, die mit solch einer Integration prinzipiell gegeben sind.

2 Grundlagen der Mehrfachrepräsentation und der maßstab-sabhängigen Darstellung

2.1 Definitionen des Maßstabsbegriffs

Maßstab ist ein komplexes Phänomen, welches unterschiedlich definiert werden kann [Bian 1997]:

Kartographischer Maßstab wird definiert durch das Verhältnis eines Abstandes in der Natur und in der Karte. Ein großer Maßstab (kleine Maßstabszahl) beschreibt einen kleinen Ausschnitt der Realität in großem Detail, während ein kleiner Maßstab Information über einen großen Bereich gibt.

Geographischer Maßstab ist gerade entgegengesetzt dem Kartographischen Maßstab definiert. Er beschreibt die räumliche Ausdehnung eines Untersuchungsgebiets und ist daher groß, wenn das Gebiet groß ist, und klein umgekehrt.

Operationeller Maßstab: Hiermit wird der Maßstab charakterisiert, auf dem bestimmte räumliche Phänomene operieren. Er wird auch als 'scale of action' beschrieben, als der Maßstab, in dem Phänomene am besten beobachtbar sind. Methoden, diesen Maßstab zu ermitteln sind u.a. die lokale Varianz, Texturmerkmale oder fraktale Dimension. Der operationelle Maßstab ist objektabhängig – für einen Wald ist er kleiner als für einen Baum.

Auflösung: Hiermit wird die kleinste beschreibbare Einheit bezeichnet. Dies ist beispielsweise die Größe eines Pixels in einem Fernerkundungsbild oder auch das Erfassungsintervall bei einer Erfassung eines Phänomens (DHM, Wetterdaten, Bevölkerungsdaten, ...).

Mit dem Maßstabsbegriff stehen in GIS noch folgende Begriffe in Zusammenhang: Präzision (Detaillierungsgrad einer Messung), Genauigkeit (Beziehung zwischen Messung und der Realität, die sie wiedergeben will), und Auflösung (kleinstes Objekt, welches dargestellt werden kann) [Devoegele, Parent & Spaccapietra 1998].

Prinzipiell lassen sich neben der räumlichen Auflösung auch noch die thematische und zeitliche Auflösung spezifizieren [Peng 1997]. Ersteres betrifft die thematische Spezifikation und Detailliertheit eines Datensatzes. Hierunter fallen die Anzahl von Klassen, sowie die Reichhaltigkeit der Attributierung. Die zeitliche Auflösung betrifft den Abstand zwischen aufeinanderfolgenden Messungen.

2.2 Formen der Mehrfachrepräsentation

Es existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Ausprägungen mehrfach repräsentierter Objekte. Diese hängen von den zugrundeliegenden Datenstrukturen, von den Aufgaben und vom Kommunikationsmedium ab. Im Folgenden wird eine kurze Aufstellung gegeben, einige der Repräsentationsformen werden später im Detail besprochen.

- ▷ Unterschiedliche Datenmodelle: diese bestimmen den thematischen Fokus, und damit den Ausschnitt der Realität, der für die momentane Fragestellung wichtig ist.
- ▷ Unterschiedliche Datenstrukturen (Raster, Vektor): ein räumlicher Sachverhalt kann sowohl in Raster- als auch in Vektorform beschrieben werden.
- ▷ Bilder unterschiedlicher Spektralkanäle stellen unterschiedliche Repräsentationen des gleichen Sachverhaltes dar.
- ▷ Ergebnisse der Prozessierungsschritte eines Bildes mittels Bildverarbeitung resultieren in verschiedenen Repräsentationen, welche unterschiedliche Aspekte des Dargestellten hervorheben: Kantenbilder, Regionenbilder, Klassifikationen, ...
- ▷ Durch eine Bildpyramide (Maßstabsraum) entstehen Repräsentationen unterschiedlicher Detailliertheit. Diese Bildsequenz kann auch durch ein räumliches Annähern an ein Objekt erzeugt werden.

- ▷ Vario-Scale: Der Maßstab ändert sich auch innerhalb einer Darstellung (Lupen-Effekt), um bedeutende Information speziell hervorzuheben.
- ▷ Skizzen und Beschreibungen.

Zur Beschreibung räumlicher Zusammenhänge werden oft Skizzen oder Beschreibungen verwendet: Bekannt sind Skizzen, mit denen man den Weg beschreibt. Schwierige räumliche Beziehungen werden oft verbal formuliert ('das Haus, welches hinter dem steht, welches einen hässlichen Erker hat'), mit Hilfe von Gesten oder durch Skizzen [Blaser, Sester & Egenhofer 2000]. Hiermit ergibt sich daher eine weitere Form der Repräsentation räumlicher Gegebenheiten – sie hat viel Ähnlichkeit mit GIS-Darstellungen, jedoch auch einige Unterschiede. Insbesondere unterscheiden sie sich durch die Semantik, welche in einer Skizze explizit modelliert und vorgegeben sein muss. Dies trifft insbesondere für die Relationen zu: wird in einer Skizze eine Kirche in der Mitte eines Dorfes gezeichnet, so kann bedeuten, dass die Kirche sich (irgendwo) im Dorf befindet, kann aber auch ausdrücken, dass sie wirklich in der geometrischen Mitte steht. Hier stellt sich die Frage, wie die verschiedenen Bedeutungen unterschieden werden können. Auch in Wegeskizzen werden lange, gerade Strecken üblicherweise nicht maßstabsgetreu, sondern verkürzt, gezeichnet, komplizierte Übergänge jedoch oft vergrößert dargestellt [Freksa 1999].

2.3 Eigenschaften der maßstabsabhängigen Darstellung

Eine maßstabsabhängige Betrachtung von Objekten der Realität wird erforderlich, da Daten in unterschiedlichen Maßstäben unterschiedliche Information beinhalten.

Each level of the hierarchy has its own unique properties that are not the simple summation of the disaggregated parts. New properties emerge when data are aggregated spatially ([Bian 1997], S.14).

Bei der Generalisierung können damit neue Objekte hinzukommen, da manche Strukturen erst aus größeren Distanzen bzw. in höheren Aggregationsstufen sichtbar werden [Ormeling 1996]. Auch [Hoffmann 1976] hält fest, dass die Generalisierung ein qualitativ anderes Muster der realen Umwelt darstellt, welches andere Eigenschaften aufweist als die genauere Aggregationsstufe.

In der automatischen Bildanalyse werden Mehr-Skalen-Ansätze seit längerem erforscht und genutzt. Wichtigste Aufgabe ist die hierarchische Gliederung, die durch eine Vergrößerung des Bildinhalts erreicht wird. Dieser Ansatz hilft somit, die Objekte in der groben Auflösung zu detektieren – dort ist ihre genaue Struktur jedoch degradiert (verformt, verschoben); daher wird die Form und Position anschließend in der feinsten Repräsentation ermittelt. Diese genaue Untersuchung wäre alleine in der höchsten Auflösungsstufe zu aufwendig. Damit gibt der Maßstab auch einen Weg der Analyse vor: *Detektion* der Objekte in geringer Auflösung – *Lokalisierung* bzw. genauere Inspektion in hoher Auflösung.

Generell gilt, dass übergeordnete Aussagen sich auf höheren Ebenen treffen lassen, während die Details in den unteren Ebenen offengelegt und untersucht werden.

Die Modellierung und Erzeugung des *Maßstabsraums* in der Bildanalyse wird durch systematische Glättung (meist durch eine Tiefpaßfilterung z.B. mit einem Gaußfilter) erreicht. Im Maßstabsraum gilt, dass mit wachsendem Maßstab keine neuen Details entstehen, sondern lediglich verschwinden können. Dies erlaubt ein relativ einfaches Verfolgen von Strukturen im Maßstabsraum. Im symbolischen Bereich allerdings gibt es Gesetze dieser Art nicht. Innerhalb bestimmter Maßstäbe treten lediglich Skalierungen auf – allerdings gibt es auch abrupte Übergänge, die nicht mittels Glättung modelliert werden können. Diese können chaotisch, nicht-deterministisch sein, und folgende Gründe besitzen:

1. Maßstabsabhängige Übergänge: Die Änderung des Maßstabs erzeugt unterschiedliche Erscheinungsformen der Objekte, welche die jeweils vorherrschende Struktur betonen, und dann durch einen entsprechenden Wechsel in der symbolischen Beschreibung charakterisiert werden. Für das eingangs erwähnte Beispiel eines Waldes ändert sich das Aussehen bei der Annäherung in einer Weise, die in strukturellen, symbolischen Änderungen resultiert (grüne Fläche → einzelne Bäume → Blätter und Äste, ...). Damit wird deutlich, dass ein Wald ein zusammengesetztes Objekt ist, welches aus Unterobjekten besteht, die jeweils wieder aus einzelnen Komponenten bestehen – und nicht lediglich ein vergrößertes Blatt.

2. Anwendungsabhängige Übergänge: Der Maßstab ist nicht das einzige Kriterium, welches über das Erscheinungsbild von Objekten entscheidet. Das würde implizieren, dass kleine Objekte schlechter sichtbar sind bzw. beim Gang durch den Maßstabsraum schnell verschwinden, während große Objekte auch in groben Auflösungen zu sehen sind, d.h. im übertragenen Sinne: dass große Objekte auch von großer Bedeutung sind. Dies ist jedoch nicht unmittelbar und zwingend der Fall. Auch in der visuellen Bildanalyse zeigt sich, dass mitunter kleine Objekte aufgrund ihrer speziellen Bedeutung erhalten bleiben (z.B. kann man Verkehrszeichen auch von weitem sehr gut erkennen – sie sind durch ihre Farbe als besonders bedeutend gekennzeichnet).

Änderungen in der Repräsentation können jedoch auch künstlich erzeugt werden, indem anstatt der Größe weitere Merkmale als bedeutungsvoll angesehen werden. Dies wird beispielsweise in der Kartographie genutzt, um Objekte entsprechend ihrer Bedeutung in der Karte darzustellen. Beispielsweise werden in einer Straßenkarte 1:200.000 die Straßenobjekte stark vergrößert dargestellt: eine 20m breite Autobahn wird mit einer Breite dargestellt, die 180m in der Natur entspricht [Lichtner 1976]. Dies geschieht zum Zwecke der Erhaltung der Lesbarkeit und der Lenkung der Aufmerksamkeit auf das Bedeutsame.

Bei Maßstabsübergängen treten semantische und geometrische Änderungen auf. Objekte können über einen gewissen Maßstabsbereich hinweg existieren, dabei aber auch ihre Eigenschaften ändern. Während die glatten Übergänge kontinuierlich beschrieben werden können, bedürfen die Sprünge einer symbolischen Beschreibung – etwa durch ein Regelwerk.

Die maßstabsabhängige Darstellung ermöglicht es prinzipiell, eine komplexe Gesamtaufgabe in handhabbare Einzelteile zu untergliedern. Der grob-zu-fein-Ansatz hilft strukturieren, indem die Aufmerksamkeit zunächst auf das Wesentliche gelenkt wird. Ist dies erfasst, so können dann gezielt die interessierenden Details weiter untersucht werden. Damit reduziert sich auch die Berechnungszeit.

Jedes Phänomen benötigt einen spezifischen Maßstab für seine Charakterisierung. Ist dieser bekannt, so kann dieser Datensatz gezielt für ein Objekt (bzw. eine Aufgabenstellung) erzeugt und genutzt werden. Dies steht im Gegensatz zur gängigen Arbeitsweise, bei der ein Datensatz gesucht wird, welcher die Auflösung besitzt, die der Fragestellung am ehesten nahekommt.

2.4 Warum Generalisierung in GIS ?

Geo-Informationssysteme dienen dazu, räumliche Daten zu erfassen, verwalten, analysieren und visualisieren (EVAP-Prinzip). Generalisierung betrifft die Abstraktion der Aspekte der Realität, die für eine bestimmte Fragestellung wichtig ist. Generalisierung tritt bereits bei der Datenerfassung auf, wo ein Modell der Wirklichkeit aufgestellt wird, in dessen Licht Objekte gesehen und erfasst werden. Objektgeneralisierung ist damit ein als Prozess, der während der Datenerfassung abläuft [Grünreich 1995]. Das Datenmodell bestimmt den Ausschnitt der Realität, sowie die Eigenschaften der Objekte, die im System verfügbar sind – damit bestimmt es auch die Reichhaltigkeit der damit möglichen Anwendungen. Als diskrete Approximation einer kontinuierlichen Realität kann es aber immer nur eine Untermenge dieser darstellen [Buttenfield & DeLotto 1989]. Dies betrifft auch die Auflösung, die im Datenmodell implizit oder auch explizit gegeben ist. Diese bestimmt somit, welche Analysen auf diesen Daten möglich sind. Das bedeutet, dass alle GIS Objekte immer das Ergebnis einer Generalisierung sind, da die Daten eine Abstraktion der Realität darstellen. Auflösung oder Maßstab kann in digitalen Datenbeständen besser als konzeptionelle Auflösung der abzubildenden Objekte gesehen werden. Dies drückt sich auch dadurch aus, dass manche thematische Karten direkt mit einem bestimmten Maßstabsbereich in Verbindung gebracht werden (z.B. Straßenkarte – Maßstab 1:200.000).

Karten werden traditionell dazu eingesetzt, ortsbezogene Anwendungen zu vermitteln. Diese große Vielfalt existierender Karten muss auch durch GIS befriedigt werden. Dazu müssen GIS graphische Darstellungen in beliebigen Kartenmaßstäben und zu beliebigen Thematiken bereitstellen [Töpfer 1992b]. Dies bedeutet, dass Mechanismen nötig sind, aus gegebenen Modellen abgeleitete Repräsentationen geringerer semantischer und geometrischer Auflösung zu erhalten. Dieser Prozess wird auch als Modellgeneralisierung bezeichnet. Hierzu sind Programme erforderlich, welche die Übergänge zwischen den verschiedenen Maßstäben durchführen.

Generalisierung, d.h. die Reduktion von Information, wird in der Kartographie wesentlich durch die begrenzte Darstellungsfläche analoger Karten erzwungen. Diese Notwendigkeit fällt bei der Speicherung in digitaler Form

weg – sie kann prinzipiell darstellungsunabhängig erfolgen. Damit kann zwischen kartographische Präsentation als Kommunikationsmittel und der Datenspeicherung unterschieden werden [Grünreich 1992]. Die Visualisierung der gespeicherten Geodaten kann zwar durchgeführt werden, um jedoch ein ansprechendes, lesbares Kartenbild (bzw. Bildschirmbild) zu erhalten, ist eine kartographische Generalisierung nötig.

Die Präsentationskomponente ist daher auch in GIS von großer Bedeutung, ermöglicht sie es dem Nutzer doch direkt, sich ein Bild von der räumlichen Situation zu machen. Hier ist wichtig, dass die Visualisierung dergestalt ist, dass sie die relevante Information vermittelt und bereits eine visuelle Analyse erlaubt. Dazu gehört, dass die Daten verständlich sind, sich durch eine entsprechende Symbolik unterscheiden, und auch in einer Auflösung bereitgestellt sind, in der die wichtigen – bedeutenden – Objekte voll erkennbar dargestellt werden können. Für die Gebietssuche ist ein systematisches Einzoomen von einem kleinen hin zu einem großen Maßstab nötig. Generell ist es wichtig für die visuelle Inspektion, neben der Übersichtsinformation auch die Details untersuchen zu können. Nur aus der Übersicht ergeben sich wichtige Interpretations- und damit Verstehens-Hinweise: es lassen sich dicht besiedelte Gebiete hoher Objektkonzentration von leeren Flächen unterscheiden, Objekte können in ihrem Zusammenhang betrachtet werden, die Verteilung von Mustern kann analysiert werden [Spiess 1995]. Wird eine räumliche Situation lediglich verkleinert, so bewirkt dies eine Darstellung der Gesamtsituation auf kleinstem Raum, welche mitunter nicht mehr lesbar ist. Hier gelten die gleichen Kriterien, die für die kartographische Präsentation einer Karte gelten. Dies gilt insbesondere, da GIS auch genutzt werden, um Papierkarten abzuleiten, d.h. sie müssen über die Generalisierungsfunktionalität verfügen. GIS müssen also Bildschirmdarstellungen verschiedener, beliebig wählbarer Inhaltsmengen ermöglichen [Töpfer 1992a].

Die Lesbarkeit auf dem Bildschirm wird durch Schwellwerte beschrieben: minimale Strichbreite, minimaler Abstand zwischen Objekten, minimale Längen, Flächen, Breiten ([Ruas & Plazanet 1996]). Für Bildschirme gelten andere Werte als für Karten (vgl. [Glover & Mackaness 1999]). Auf einem Bildschirm können üblicherweise Auflösungen von etwa 0.3 mm pro Pixel erreicht werden [Spiess 1995]. Vergleicht man dies mit der Kartiergenauigkeit von 0.1 mm, und berücksichtigt noch weitere Kriterien der Zeichenlesbarkeit, so kann man daraus ableiten, dass kartographische Darstellungen am Bildschirm etwa im doppelten Maßstab der entsprechenden Karte gezeigt werden müssen [Töpfer 1992b]. Außer der Auflösung ist auch der erzeugbare Kontrast beim Bildschirm geringer als auf Papier. Tests haben weiterhin ergeben, dass die gegenüber Papier schlechteren Abbildungs- (bzw. Diskriminierungs-) eigenschaften dazu führen, dass Darstellungskonflikte bereits in größeren Maßstäben entstehen [Spiess 1995].

Über die visuelle Inspektion und Analyse hinaus eröffnet das GIS jedoch die Möglichkeit der automatischen Analyse. Diese kann einerseits auf den gespeicherten Objekten arbeiten, wie sie aus der Erfassung stammen – ohne aufgrund visueller Beschränkungen deformiert zu sein. Andererseits können sie aber auch aggregierte Strukturen nutzen. Damit wird eine effiziente und angemessene räumliche Analyse möglich [Mark 1991].

Generell wird somit die Möglichkeit gegeben, die Realität auf unterschiedlichen Abstraktionsniveaus zu beschreiben und die jeweils wichtige Information hervorzuheben. Die Interaktionsmöglichkeit des GIS erlaubt zudem, dass diese unterschiedlichen Aggregationsniveaus flexibel untersucht werden können: nachdem der Nutzer eine Übersicht gewonnen hat, kann er an der interessierenden Stelle einzoomen. Dies führt dazu, dass die kartographischen Ansprüche an die Qualität der Visualisierung etwas verringert werden können.

Wichtig ist es, applikationsabhängig – themenbezogen – eine Darstellung ableiten zu können. Hier liegt der Schwerpunkt eher auf der schnellen on-the-fly-Visualisierung, und weniger auf der kartographischen Gestaltung [Dunkars 1998]. Für die Darstellung einer bestimmten Thematik benötigt der Nutzer zusätzlich noch Information über weitere Objekte, die der Orientierung und der Wahrung des Landschaftscharakters dienen. Diese 'Nebenobjekte' müssen allerdings nur in generalisierter Form erscheinen. Für die Erstellung einer touristischen Karte kann so z.B. auf die Sehenswürdigkeiten und die sie erschliessenden Straßen fokussiert werden; eine Straßenkarte enthält die wichtigsten Straßen, während eine hydrologische Karte primär die Gewässer enthält.

Weiterhin gilt, dass die höchste Auflösung nicht immer die beste ist – die Repräsentation wird im Wesentlichen durch die Anwendung gesteuert. Beispielsweise erfordert die Frage nach der Bebauungsdichte nicht die detaillierten Aufschlüsselung der einzelnen Nutzungen, sondern eine aggregierten Darstellung. Diese applikationsabhängige Generalisierung von Daten ist elementar wichtig. Somit können typische, charakteristische Eigenschaften und Funktionen der jeweiligen Applikation erhalten bleiben, während Uninteressantes nicht beachtet wird. Damit wird ermöglicht, globale Fragestellungen zu beantworten und die Details zu ignorieren.

Diese Fokussierung auf das Wesentliche beinhaltet eine Beschleunigung der Analysen, sowie eine Reduktion des Speicherbedarfs. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund der Verbreitung der Daten über das Internet von großer Bedeutung: ein Anwender sollte nur die Daten beziehen (kaufen und transferieren) müssen, die für seine Anwendung nötig sind. Auch im Hinblick auf ortsbezogene Anwendungen (*location aware applications*), welche Daten in Abhängigkeit von der Position des Nutzers auf ein mobiles Endgerät laden, sind solche Fragestellungen elementar: hier ist wichtig, dass nur die relevante Information übertragen ist, und diese visuell so aufbereitet ist, dass der Nutzer sie unmittelbar versteht [Volz, Sester, Fritsch & Leonhardi 2000].

Die zunehmende Verfügbarkeit von Datenbeständen, speziell über das Internet, verbunden mit den hohen Kosten der Datenerfassung machen erforderlich, dass GIS über Funktionalität verfügen, heterogene Datenbestände zu integrieren. Das bedeutet, GIS sollen Datenbestände aus unterschiedlichen Quellen und unterschiedliche Maßstäben, welche das gleiche räumliche Phänomen beschreiben, handhaben können. Damit wird Generalisierung in GIS für folgende Zwecke benötigt (vgl. z.B. [Weibel 1995], [Devogele, Trevisan & Raynal 1996]):

Kontrollierte Datenreduktion: das Datenvolumen wird reduziert und führt damit zu geringerem Speicherbedarf und zu einer schnelleren Bearbeitung.

Dateninspektion (visuell): erlaubt intelligentens Zoomen, so dass bei genauerer Inspektion immer mehr Details hinzukommen, und nicht lediglich einer Vergrößerung der Objekte stattfindet.

Dateninspektion (automatisch): zum einen können Daten unterschiedlicher Auflösung auf einen einheitlichen Maßstab gebracht werden (Homogenisierung), um somit gemeinsam analysiert zu werden. Zum anderen ergibt sich die Möglichkeit der hierarchischen Datenanalyse. Damit können Anfragen auf verschiedenen Repräsentationen gleichzeitig bzw. integriert erfolgen.

Maßstabsabhängige und aufgabenspezifische Darstellungen ableiten: dies kann zur Erzeugung eines konkreten Maßstabs erfolgen, aber auch zur Ableitung einer angemessenen Repräsentation für eine spezielle Aufgabenstellung.

Datenfortführung: kann automatisiert werden, indem Änderungen vom detaillierten Maßstab in die Folgemaßstäbe propagiert werden.

Präsentation: zum einen kann eine gut lesbare und verständliche Bildschirmpräsentation abgeleitet werden; andererseits können auch Papierkarten produziert werden.

Datenqualität: für Kartographische Institutionen kann die Qualität der Datenbestände besser kontrolliert werden: dies wird durch einheitliche Datenstrukturen erreicht. Weiterhin können Qualitätsmaße automatisch aus den Daten abgeleitet werden.

Aus diesen Gründen wird die Möglichkeit der Datenabstraktion, d.h. der Ableitung weniger detaillierter Daten aus einem hochdetaillierten Datensatz, als fundamental für GIS angesehen [Bundy, Jones & Furse 1995]. Müller [1991] führt als wichtige Forderung für digitale Kartographie die Möglichkeit an, Daten blattschnitt- und maßstabsfrei handhaben zu können. Damit können Geodaten in unterschiedlichen Maßstäben für unterschiedliche Aufgaben und Zwecke genutzt werden. Auch vom UCGIS (University Consortium for Geographic Information Science) wird die Forschung bezüglich des Maßstabs als kritischen Faktor für den Fortschritt aller geowissenschaftlichen Forschungen angesehen [UCGIS 1998]. Wichtig ist es, Möglichkeiten zu haben, Daten auf und ab zu skalieren, um somit Phänomene auf mehreren Maßstäben untersuchen zu können. Als wesentliche Forschungsaspekte werden dabei herausgestellt:

- ▷ den Wechsel der Maßstäbe zu automatisieren,
- ▷ Daten auf mehreren Maßstabsebenen simultan vorzuhalten – diese Forderung betrifft Repräsentations-schemata, die multiple Repräsentationen verwalten können,
- ▷ den Einfluss des Maßstabs auf Analyse und Schlußfolgerungsoperationen zu untersuchen,
- ▷ den optimalen Maßstab für eine gegebene Aufgabe zu bestimmen,
- ▷ die Verbindung von geometrischem und attributivem Generalisieren zu untersuchen.

Diese Arbeit widmet sich primär dem ersten Punkt.

3 Erzeugung, Verwaltung, Analyse und Präsentation mehrfach-präsentierter Datensätze aus Bildern und Oberflächen

In der Bildanalyse und für die Bearbeitung und Darstellung von Oberflächen werden Aggregationsverfahren schon seit längerem eingesetzt. Im Fall von Oberflächen geht es primär darum, eine schnelle Visualisierung zu ermöglichen, bzw. Sichtbarkeitsanalysen durchzuführen. In der Bildverarbeitung werden sie darüber hinaus auch für die Analyse eingesetzt.

3.1 Mehrfachrepräsentation in der Bildverarbeitung

3.1.1 Erzeugung und Repräsentation

Die Bilderzeugung erfolgt durch Kameras bzw. andere bildgebende Sensoren. Diese unterscheiden sich bezüglich ihrer radiometrischen und geometrischen Auflösung. Im radiometrischen Bereich gibt es neben panchromatischen Aufnahmesystemen auch Multi-spektral- bzw. Hyperspektral-Systeme. Typische Auflösungen für geographische Fragestellungen sind: Luftbilder mit einer typischen Bodenauflösung von etwa 20 cm und Satellitenaufnahmen mit Auflösungen von mittlerweile 1m bis 1000m (SpaceImaging, Earthwatch, ..., Landsat, Spot, NOAH, etc.) [Fritz 1995]. Mittels flugzeuggetragenen Systemen lassen sich nahezu beliebige Auflösungen erreichen, typisch sind jedoch Auflösungen im Dezimeter-Bereich. Dies sind auch die Auflösungen, die in der Luftbildphotogrammetrie üblicherweise verwendet werden.

Die Erfassung bestimmt daher zum einen die thematische aber auch die geometrische Auflösung der Bilddaten. Aus diesen Daten können nun weitere, abgeleitete Bilder oder Strukturen ermittelt werden.

Unterschiedliche Thematiken lassen sich aus Bildern ableiten, indem Bildanalyseoperatoren angewandt werden: Kantenfinder extrahieren die markanten Übergänge zwischen den Grauwerten, welche Hinweise auf Objektgrenzen geben, während Regionenoperatoren danach suchen, homogene Gebiete abzugrenzen (z.B. [Haralick & Shapiro 1993], [Jähne 1989], [Pinz 1996]). Durch Klassifikationsverfahren lassen sich neue Bilder ableiten, bei denen der Pixelwert die Zugehörigkeit zu einer Objektklasse ausdrückt [Lillesand & Kiefer 1999]. Somit entstehen durch gezielte Anwendung von Bildverarbeitungsoperationen neue Repräsentationen der gegebenen Situation, welche auf bestimmte Aspekte fokussieren.

Maßstabsabhängige Darstellungen entstehen typischerweise durch eine Sequenz von Glätten und Reduktion [Quattrochi & Goodchild 1997], [Buttenfield & McMaster 1991]. Die Grundlage ist also eine Mittelung der Grauwerte benachbarter Pixel. Nach einer Tiefpassfilterung kann jede zweite Zeile und Spalte entfernt werden [Heipke 1995]. Wird dieser Algorithmus sukzessive angewandt, so entsteht eine sogenannte Bildpyramide, d.h. eine Bildserie, die ein gleiches Bild in verschiedenen Auflösungsstufen darstellt. Interessant ist zu sehen, dass das Datenvolumen einer Pyramide relativ gering ist. Für den zweidimensionalen Fall erhöht sich der Speicherbedarf um etwa 1/3 gegenüber dem Ausgangsdatsatz, im dreidimensionalen sind es lediglich 1/7. Der relative Bedarf an Speicher errechnet sich für die Dimension n genähert aus

$$\frac{Vol(A)}{Vol(A_0)} \cong \frac{2^n}{2^n - 1},$$

wobei A_0 den Ausgangsdatenbestand, und A den der gesamten Pyramide darstellt.

Mit zunehmender Glättung nimmt das Rauschen ab, kleine Objekte verschwinden, die Strukturen werden homogener, gleichartiger und die groben, großen Strukturen bleiben erhalten. Allerdings ist ihre Position verfälscht. Auf der geringen Auflösungsstufe lassen sich zwar die wichtigsten Objekten detektieren – allerdings 'verschmieren' die Objekte, ihre Position ändert sich. Die Form und Position ist hingegen in der höchsten Auflösung sehr genau zu bestimmen. Durch die gemeinsame Betrachtung aller Pyramidenebenen können die Vor- und Nachteile der verschiedenen Auflösungen ausgeglichen und zum Vorteil genutzt werden.

Hierbei wird impliziert, dass der Maßstab (bzw. die Entfernung) das einzige steuernde Element ist, was bedeutet, dass große Objekte in großer Entfernung noch sichtbar sind, während kleinere verschwunden, bzw. in den größeren aufgegangen sind. Dass dies nicht immer der Fall ist, belegt die Tatsache, dass auch die Textur von

großer Bedeutung ist. Dies nutzen beispielsweise Zebras aus, deren Streifenmuster in einiger Entfernung derart mit dem Hintergrund verwischt, dass sie nicht mehr wahrnehmbar sind. Gleiches gilt für andere Formen der Tarnung bei Tieren oder Pflanzen. Farben spielen auch eine dominierende Rolle, was sich auch beim Betrachten von Satellitenbildern zeigt, wo z.B. Straßenobjekte noch sichtbar sind, obwohl ihre Größe unter der erfassten Pixelgröße liegt: aufgrund ihrer Farbe überstrahlen sie die neben ihnen liegenden Objekte und dominieren sie. Dies bedeutet, dass neben der Objektgröße auch noch die Farbe und Textur von Bedeutung sind dafür, ob und wie sich ein Objekt im Maßstabsraum darstellt und verhält.

Wichtig ist zu sehen, dass die Beziehungen zwischen den Maßstäben (Pyramidenebenen) bekannt sind, da sie durch eine bekannte Vorschrift auseinander hervorgegangen sind. Jedes Pixel kann daher direkt auf seinen Vorgänger oder Nachfolger in der Pyramide zeigen. Diese wichtige Eigenschaft wird für Analyseaufgaben ausgenutzt.

Dieser Ansatz der Mehrfachrepräsentation kann für verschiedene Zwecke eingesetzt werden, z.B. für die Bildkodierung (Laplacepyramide), die Visualisierung, die Bildsegmentierung, die Interpretation und die Zuordnung. Insbesondere die letzteren machen sich die Tatsache zunutze, dass durch die Pyramide sowohl globale als auch lokale Information über das Bild gewonnen werden kann, indem es in mehreren Auflösungsstufen untersucht wird.

In der Bildanalyse muss üblicherweise im gesamten Bild nach interessanten Strukturen gesucht werden. Daher müssen Strategien zur Verfügung stehen, diese Suche zu steuern und zu beschleunigen. Ein Top-Down-Ansatz geht dazu nach einer grob-zu-fein-Strategie vor. Auf jeder Stufe wird die entsprechende Stufe der Bildpyramide herangezogen. Dadurch ergeben sich folgende Vorteile:

- ▷ Gewinnung grober Näherungswerte aus hohen Pyramidenstufen: Diese reichen aus, da lokale Operatoren auf grober Stufe globalen Charakter haben – damit kommen alle Bildstrukturen in die Reichweite lokaler Operatoren.
- ▷ Reduktion der Komplexität.
- ▷ Erhöhung der Konvergenzgeschwindigkeit.
- ▷ Erhöhung der Zuverlässigkeit, da sich die Gefahr, in lokalen Extrema hängen-zubleiben, verringert.
- ▷ Verringerung des Berechnungsaufwands.

3.1.2 Anwendung von diskreten Pyramiden

3.1.2.1 Merkmalspyramide

Neben den reinen Grauwerten lassen sich auch aus den Bildern abgeleitete Größen aus den Bildern zu Pyramiden anordnen. Bekannt sind Punkt-, Kanten- oder auch Regionenpyramiden.

Ein populärer Punktfinder ist der Interest-Operator nach Förstner [Förstner & Gülch 1987]. Das Verhalten dieses Operators im Maßstabsraum hat Heikkilä [1989] untersucht. Er stellte dabei fest, dass die Position markanter Punkte zwar die typischen Verschiebungen bezüglich der Glättung des Bildes aufweisen. Allerdings sind sie in gewissen Bereichen stabil bezogen auf den internen Maßstab des Operators. Viele Verfahren der Photogrammetrischen Bildanalyse basieren auf der Extraktion und Zuordnung markanter Punkte [Heipke 1995]: Generierung von digitalen Höhenmodellen ([Ackermann & Hahn 1991], [Krzystek 1991]) Aerotriangulation ([Tsingas 1992], [Schenk & Toth 1993] [Fritsch 1995]), Punktübertragung [Hahn, Kiefner, Quednau & Hinz 1996].

3.1.2.2 Aggregierte Merkmale

Zimmermann [1991] beschreibt einen Ansatz zur Navigation von Fahrzeugen aus Bildfolgen. Aus der Zuordnung zwischen den einzelnen Bildern einer Sequenz kann die Fahrzeugtrajektorie rekonstruiert werden. Die Zuordnung wird aufgrund höherwertiger Merkmale durchgeführt. Diese Merkmale sind sogenannte Konstellationen,

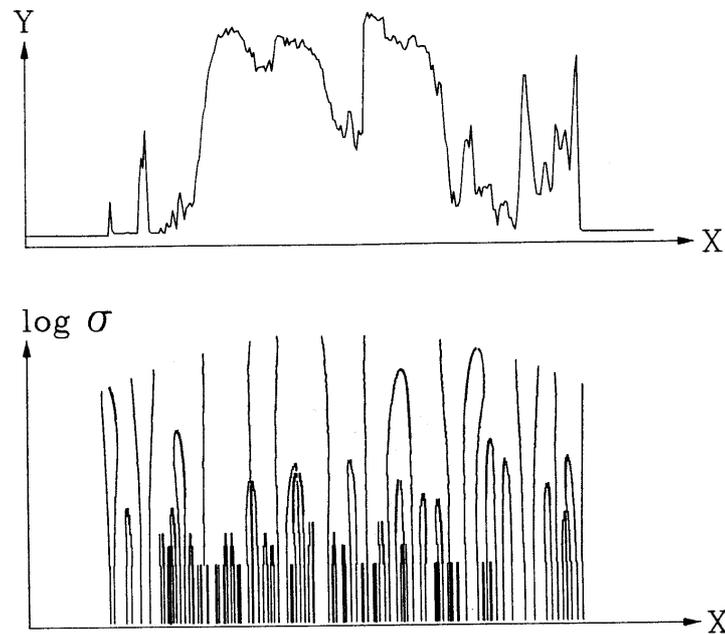


Abbildung 3.1: 1D-Signal (oben), zugehörige Nulldurchgänge der zweiten Ableitungen im Scale Space (unten).

welche sich aus markanten Punkten in unterschiedlichen Auflösungen zusammensetzen: Ein Punkt in einer groben Auflösung wird mit 'Satelliten' höherer Auflösung, die in seiner Nähe liegen, verknüpft, und bildet somit ein maßstabsabhängiges Merkmal. Aufgrund dieser 'reichen' Merkmalsbeschreibung läßt sich eine Zuordnung zwischen aufeinanderfolgenden Bildern herstellen und damit die Trajektorie rekonstruieren.

3.1.3 Scale Space – Maßstabsraum

Intensitätsänderungen treten in einem Bild in verschiedenen Maßstäben zu Tage. Um sie zu detektieren, wird das Bild mit Tiefpaßfiltern unterschiedlich starker Glättung (Parameter σ) gefiltert – so entsteht eine Bildserie. Üblicherweise werden in diesen Bildern anschließend Kanten gesucht. Auf diese Weise erreicht man eine Detektion von Intensitätsänderungen in den verschiedenen Maßstäben.

Marr & Hildreth [1980] nutzen diesen Ansatz, indem sie das Bild mit einem Gaußfilter glätten und anschließend einen Laplace Operator zur Kantenfindung anwenden (LoG-Operation). Als Objektkanten definieren sie anschließend diejenigen Kanten, die in vielen Maßstäben ähnlich sind und sich auch ungefähr an der gleichen Position befinden ('*constraint of spatial localization*').

Neben der diskreten Pyramide kann jedoch auch eine kontinuierliche Pyramide aufgebaut werden, womit beliebige Maßstäbe im *Maßstabsraum* erzeugt werden. Dies wurde von Witkin [1986] eingeführt, der den Maßstabsparameter als kontinuierlich eingeführt hat und auch den Begriff des *Scale Space* prägte. Er untersuchte (in 1D) das Verhalten von extrahierten Kanten bei sich kontinuierlich vergrößerndem Maßstab am Beispiel der Extraktion von Nullstellen der zweiten Ableitung (zero crossings). Hierbei zeigt sich ein typisches, einfaches Verhalten: die Kanten bilden geschlossene Konturen im Maßstabsraum, die entweder gerade sind, oder zusammenlaufen. Abbildung 3.1, oben, zeigt ein eindimensionales Signal, sowie darunter den typischen Verlauf der Nulldurchgänge der zweiten Ableitung im Maßstabsraum. Es ist festzustellen, dass mit wachsendem Maßstab keine neuen Kanten hinzukommen können, sie können nur verschwinden (oder mit anderen verschmelzen). Den Maßstab, an dem die Kante verschwindet nennt Witkin *den Maßstab* des Objekts. Umgekehrt kann man sagen, dass mit abnehmendem σ zwar neue Kantenelemente hinzukommen können, aber keine verschwinden: '*Blurring cannot create detail, it can only destroy it*'. D.h. alle Kanten im groben Maßstab lassen sich durch den Maß-

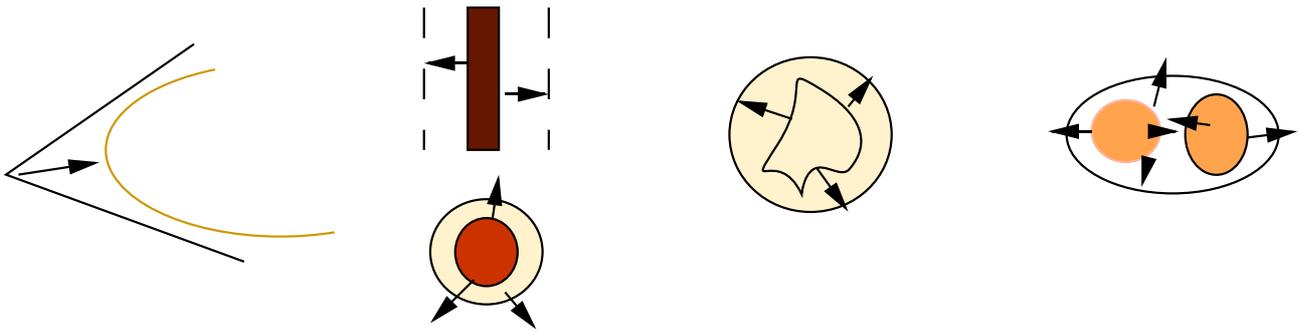


Abbildung 3.2: Veränderung von Strukturen im Scale Space.

stabsraum bis zum feinsten Maßstab hin verfolgen, dort kann dann ihre genaue Position bestimmt werden. Im Maßstabsraum gelten generell folgende Prinzipien:

1. Kausalität: Jedes Merkmal in der groben Auflösung hat einen (nicht notwendigerweise eindeutigen) Auslöser auf einer feineren Auflösung (umgekehrt gilt dies nicht). Damit ist garantiert, dass keine neuen Merkmale hinzukommen, wenn die Auflösung reduziert wird.
2. Homogenität und Isotropie: Die Glättung soll invariant bezüglich der räumlichen Lage und Richtung sein.

Dieses Konzept des kontinuierlichen Maßstabsraums lässt sich auf alle Glättungsfilter und Extraktionsmethoden anwenden, allerdings hat nur die Verwendung des Gaußfilters die wichtige Eigenschaft, dass keine neuen Details hinzukommen können, sondern nur noch verschwinden (“nice scaling behaviour”). Durch diesen kontinuierlichen Maßstabsraum lassen sich Informationen aus verschiedenen Auflösungsstufen miteinander verbinden.

3.1.3.1 Edge Focussing

Wichtig ist, dass im Maßstabsraum der Zusammenhang zwischen den einzelnen Ebenen direkt gegeben ist – er muss nicht durch aufwendige Schlussfolgerungsmechanismen nachträglich ermittelt werden. Diese Eigenschaft macht sich der Ansatz von Bergholm [1987] zur Kantenfindung zunutze. Mittels Kantenoperatoren wird versucht, einen Zusammenhang zwischen Objektkanten und Grauwertsprüngen im Bild herzustellen. Grauwertkanten ergeben sich jedoch aus unterschiedlichen Ursachen wie Tiefensprüngen, Textur, Reflexionen, Orientierungsänderungen, etc. Hinzu kommt noch Rauschen, welches das gesamte Bild überlagert. Dieses kann zwar – genau wie unerwünschte Details – durch Glätten (Tiefpaßfilterung) reduziert werden, allerdings geht dies auf Kosten der Positionsgenauigkeit der abgebildeten Objekte. Ein idealer Kantenoperator detektiert signifikante Grauwertsprünge unter Beibehaltung ihrer Position und unterdrückt unnötige Details.

Erreicht wird dieses Ziel, indem folgende Eigenschaften ausgenutzt werden: auf dem groben Level sind die groben, wichtigen Strukturen sichtbar; auf dem feinen Level lassen sich Details dieser wichtigen Strukturen erkennen. Die Idee des ‘Edge Focussing’ ist es, im groben Level die wichtigen Strukturen (hier: Kanten) zu *detektieren*, und sie im feinen Level zu *lokalisieren*. Der Zusammenhang wird dabei über eine Verfolgung im Maßstabsraum durchgeführt. Zunächst kann beobachtet werden, dass durch die Glättung folgende Phänomene auftreten (Abbildung 3.2 – vgl. auch [Sester 1990]):

1. Abrunden von Ecken.
2. Vergrößern von Objekten.
3. Verformung von Objekten in Kreise (nach genügend hoher Filterung).
4. Verschmelzen benachbarter Objekte.

Es lässt sich zeigen, dass die laterale Verschiebung eines Objektes beim Übergang von einem Maßstab zum nächsten maximal $\pm\Delta\sigma$ Pixel beträgt. D.h. eine Maßstabsänderung um 1σ führt zu einer maximalen Verschiebung eines Objektes um ± 1 Pixel. Die Diskretisierung des Maßstabsraums, d.h. die Wahl des Glättungsparameters σ basiert auf der Überlegung, wie stark sich die Position bei einem entsprechenden $\Delta\sigma$ ändert. Die Abstände der einzelnen Ebenen werden daher so gewählt, dass der Versatz eines Kantenpixels in der nächsten Ebene nicht größer als 1 Pixel ist.

3.1.4 Anisotropic Diffusion

Wie beschrieben sind Kausalität und Isotropie die beherrschenden Prinzipien im Maßstabsraum. Gerade letzte Forderung bewirkt jedoch, dass die Glättung unabhängig vom Bildinhalt durchgeführt wird, d.h. auch über (Objekt-) Kanten hinweg. Perona & Malik [1988] schlagen deshalb ein anisotropes Verfahren vor, um diesem Nachteil abzuwehren: die Glättung findet nur innerhalb von homogenen Regionen statt, an den Grenzen wird versucht, die (Grauwert-) Kanten zu erhalten, diese somit hervorzuheben.

Ihr Verfahren garantiert damit:

- ▷ Kausalität: es kommen keine neuen Details hinzu.
- ▷ Direkte Lokalisierbarkeit, da die Objektkanten nicht mehr verschoben werden.
- ▷ Stückweises Glätten.

Mit diesem Operator wird erreicht, dass sich innerhalb von Regionen eine Homogenisierung der Grauwerte einstellt, während die Kanten stärker hervortreten.

Der Ansatz kann damit als Möglichkeit angesehen werden, Geometrie und Semantik zu integrieren. Das Ziel ist dabei, Objekte zu erkennen, welche sich als homogene Gebiete darstellen. Die Glättung erfolgt nicht rein geometriebezogen, sondern in gewisser Weise objektbezogen, in dem sie von der Grauwertverteilung abhängt. Das Problem hierbei ist jedoch festzulegen, wann der Prozess stoppt, da es keine natürliche Abbruchschranke gibt.

3.1.5 Symbolischer Maßstabsraum

Problematisch am Maßstabsraum sind Sprünge, die zwischen manchen Maßstäben auftreten. Diese Sprünge in der Repräsentation treten jeweils objektbezogen auf. Sie lassen sich nicht kontinuierlich erklären, sondern sind plötzlich da: ab einem bestimmten Maßstab (Entfernung) wird von einem Baum nicht mehr die Krone als Ganzes wahrgenommen, sondern die einzelnen Blätter, aus denen sie sich zusammensetzt. Eine Modellierung erfordert daher eine geeignete Repräsentation dieser Sprünge für die jeweiligen Objekte. Hierfür sind üblicherweise explizite Regeln anzusetzen, da sie kontinuierlich nicht erklärt werden können.

Bobick & Bolles [1989] führen einen symbolischen Maßstabsraum ein. Die unterschiedlichen Repräsentationen eines Objekts werden in symbolischer Weise dargestellt. Die Beschreibung umfasst die einzelnen Repräsentationsformen, sowie einen Schlußfolgerungsmechanismus, um die einzelnen Beschreibungsebenen zu verknüpfen, d.h. Regeln für die Übergänge anzugeben (vgl. Abb. 3.3).

Sie modellieren das Aussehen eines Busches, welches sich beim Annähern verändert, und einige Transformationen durchläuft: von weitem wirkt er als eine Einheit, als eine kompakte Fläche im Bild, beim Annähern zeigen sich nach und nach die Einzelteile, von den Ästchen bis zu den Blättern, bis schließlich die 3D-Struktur sichtbar wird. Dieses Modell dient dann dazu, mit der Bildinformation verglichen zu werden, um so die Objekterkennung zu steuern. Ein Objekt gilt dann als erkannt, wenn es zum einen einer konkreten Repräsentation zugeordnet werden kann, zum anderen aber auch das gleiche Verhalten im Maßstabsraum aufweist. Die Anwendung dieses Ansatzes liegt in der Navigation: das Annähern an das Objekt wird durch den Maßstabsraum modelliert.

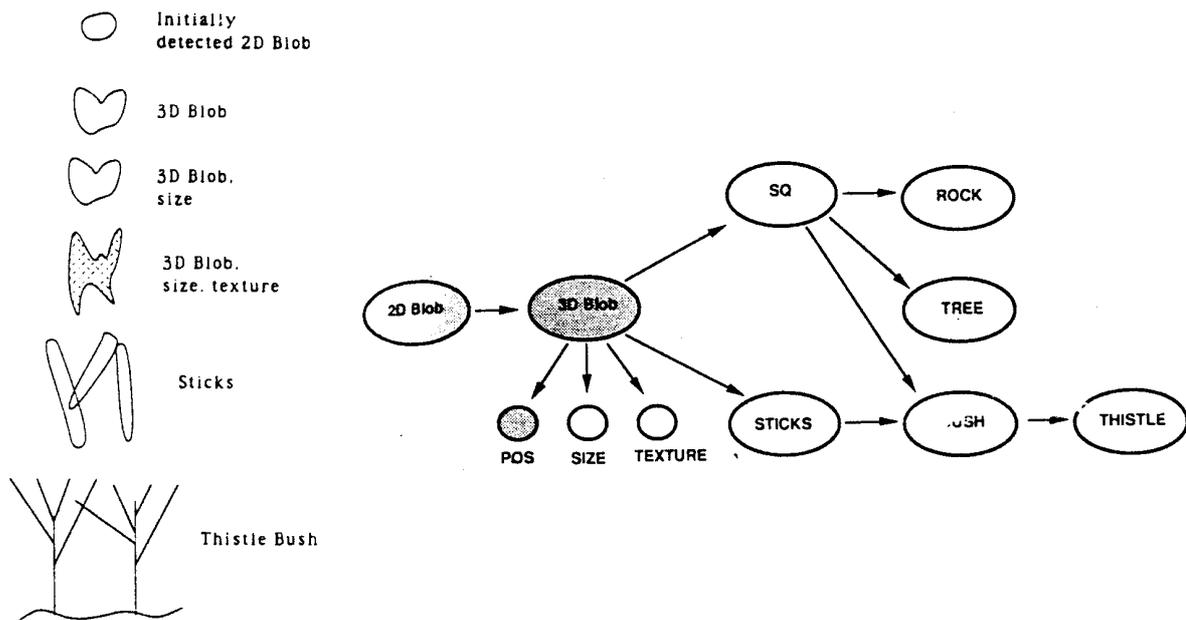


Abbildung 3.3: *Symbolischer Maßstabsraum: Verschiedene Repräsentationen eines Dornbuschs (links); symbolische Repräsentation (rechts) (aus [Bobick & Bolles 1989]).*

3.1.6 Hierarchische Multispektral-Klassifizierung

Die Auflösung hat entscheidenden Einfluss auf die Klassifizierung. Mit größerer Auflösung reduziert sich die Anzahl der Mischpixel, die üblicherweise an den Objekträndern auftreten. Hierdurch wird zunächst die Klassifikationsgenauigkeit erhöht. Gleichzeitig, und hiermit geht ein gegenteiliger Effekt einher, erhöht sich die spektrale Variation, was sich negativ auf die Klassifikationsgenauigkeit auswirkt. Anschaulich kann man sich das vorstellen anhand des Beispiels einer Streuobstwiese: während in einer groben Auflösung eine Mischung der spektralen Information von Wiese und Bäumen ein recht homogenes Bild liefert, kristallisieren sich mit zunehmender Auflösung die einzelnen Bäume heraus und dominieren mit ihren spektralen Eigenschaften [Cao & Lam 1997].

Ein räumliches Phänomen wird charakterisiert durch den Maßstab und das räumliche und thematische Aggregationsniveau in dem es beschrieben wird. Eine Objektdefinition ergibt sich somit immer nur im Lichte des aufzunehmenden Meßsystems. Für jedes Objekt existiert eine optimale Auflösung, in der es am besten beschrieben, erkannt und von anderen Objekten unterschieden werden kann. Diese Auflösung hängt von seinen internen räumlichen und spektralen Charakteristika ab. Als Möglichkeit, diese optimale Auflösung zu ermitteln, schlagen Woodcock & Strahler [1987] die *lokale Varianz* vor. In einem 3x3-Fenster wird das Mittel der Standardabweichungen errechnet. Die lokale Varianz ist gering, wenn die Auflösung viel kleiner als das Objekt der Szene ist, weil benachbarte Pixel homogen und damit korreliert sind. Gleiches gilt, wenn die Auflösung größer als das Objekt ist. Ein Maximum der lokalen Varianz ergibt sich, wenn die Auflösung etwa der Objektgröße entspricht.

Anhand einer systematischen Untersuchung eines Waldgebiets in unterschiedlichen räumlichen (verschieden Pixelgrößen) und thematischen Auflösungen (verschiedene Klassifikations- Aggregationsniveaus) wurde die jeweils optimale Klassifikation ermittelt [Marceau, Howarth & Gratton 1994]. Hierbei wurde die Objektabhängigkeit sehr deutlich. In einer weiteren Studie wurden gegebene Objektklassen (verschiedene Waldarten mit unterschiedlichen Wachstumsparametern) in unterschiedlichen Auflösungen (von 0.5 bis 29.5m) betrachtet [Marceau, Gratton, Fournier & Fortin 1994]. Die jeweils optimalen Auflösungen ergeben sich, wo die Klassenvarianz minimal ist. Klassenvarianz bezeichnet hier das Mittel der Standardabweichungen innerhalb einer Objektklasse – und nicht wie bei der lokalen Varianz innerhalb eines Fensters.

Ähnliche Untersuchungen wurden von [Fischer 2000] durchgeführt. Hier stand im Vordergrund die Frage, in wie weit die Einführung verschiedener Auflösungen in die Klassifikation das Ergebnis verbessern könnte. Idee

war, dass sich Objekte nicht nur anhand ihrer spektralen Eigenschaften unterscheiden, sondern auch anhand ihrer Charakteristika im Maßstabsraum: homogene, große Objekte sind über einige Maßstäbe hinweg homogen, während andere in einem Maßstab vielleicht eine Homogenität aufweisen, diese aber durch Aggregation entstanden ist, und daher in den genaueren Auflösungen zerfällt. Die Berücksichtigung in der Klassifikation wurde realisiert, indem die Ebenen der Pyramide als zusätzliche Kanäle mit in die Klassifikation eingebracht wurden.

Als Schlussfolgerung ergibt sich, dass hierarchische und maßstabsabhängige Ansätze verwendet werden sollten, um den unterschiedlichen optimalen Maßstäben der Objekte gerecht zu werden. Allerdings gibt es hierfür noch keine allgemein gültige Vorgehensweise.

3.2 Ansätze und Lösungen für Oberflächenmodelle

3.2.1 Erzeugung und Repräsentation

Oberflächenmodelle entstehen durch direkte Erfassung mit speziellen Sensoren wie Laserscannern, Streifenprojektoren oder Abtastern. Zudem lassen sie sich indirekt durch Stereo-Bildanalyse bestimmen. Die Oberfläche eines Objekts wird typischerweise durch vermaschte Dreiecke oder durch regelmäßige Raster beschrieben. Die Erfassung von Oberflächen mit Hilfe automatischer Verfahren wie Laserscanning oder Stereo-Punktzuordnung bedingt das Entstehen sehr großer Datenmengen [Fritsch 1999]. Großes Interesse besteht daher darin, diese Datenmengen durch Oberflächenvereinfachung zu reduzieren, um die Visualisierung zu beschleunigen, oder auch zur semantischen Reduktion der Datensätze, d.h. der Interpretation von abgebildeten Objekten.

Für die schnelle Visualisierung stehen in der Computergraphik leistungsfähige Methoden zur Verfügung. Mittels Culling können Bereiche aus dem Visualisierungsprozess ausgeschlossen werden, die momentan nicht sichtbar sind. Beispielsweise müssen die Bereiche hinter dem Betrachter nicht visualisiert werden. Eine weitere Möglichkeit der schnellen Darstellung ist es – anstelle aufwendiger, komplexer geometrischer Objektdetails – Texturen zu verwenden. Die Vereinfachung von Objekten durch Approximationsverfahren führt zu verschiedenen Repräsentationen eines Objektes in unterschiedlichen Auflösungen (Level of Detail – LOD). Für die Visualisierung wird in Abhängigkeit von Entfernung und Blickrichtung eine dieser Auflösungen gewählt. Die Idee ist, dass Abweichungen der vereinfachten Repräsentation von der Originaldarstellung nicht registriert werden, wenn der Fehler unterhalb der Wahrnehmungsgrenze liegt (Beim Bildschirm ist dies ein Pixel). Das Progressive Rendering unterstützt die Real-Time-Visualisierung, indem während der Bewegung des Beobachters lediglich eine ungenaue Darstellung gewählt wird; sobald die Bewegung jedoch stoppt, werden die Details vervollständigt. Dynamic Loading bezeichnet die Möglichkeit, nur jeweils das momentan sichtbare Gebiet in den Hauptspeicher zu laden, und die weiteren Objekte dann bei Bedarf nachzuladen [Kofler & Gruber 1998].

3.2.1.1 Methoden der Oberflächenvereinfachung

Der Übergang von einem detaillierten auf einen geringer aufgelösten Datenbestand wird üblicherweise durch Vereinfachen der Geometrie erreicht. Das Triangulationsnetz kann vereinfacht werden, indem homogene Gebiete durch große, einfache Strukturen repräsentiert werden, während detaillierte, komplexe Gebiete durch kleine Dreiecke dargestellt werden. Neben der Reduktion der Komplexität geht es bei der Oberflächenvereinfachung auch darum, eine maßstabsabhängige Darstellung zu erzeugen – sie wird hier meist mit 'multi-resolution-structure' bezeichnet. Diese erlaubt beispielsweise eine sukzessive Verfeinerung der Darstellung, etwa für das Progressive Rendering [Junger & Snoeyink 1998]. Ziel kann weiterhin sein, eine komprimierte Darstellung abzuleiten.

Zur Vereinfachung gibt es eine Fülle von Ansätzen, welche sich nach folgenden Kriterien charakterisieren lassen (vgl. [Cianpalini, Cignoni, Montani & Scopigno 1997]):

- ▷ Angabe eines Approximationsfehlers, der durch die Vereinfachung entsteht.
- ▷ Kompression des Datensatzes.
- ▷ Maßstabsabhängige Darstellung in Form von LOD's; letztere können in diskreten Stufen vorliegen oder quasi-kontinuierlich verfügbar sein.

- ▷ Effizienz bezüglich Berechnungszeit und Speicherbedarf.
- ▷ Allgemeine Anwendbarkeit.
- ▷ Möglichkeit, Diskontinuitäten zu erhalten (im Falle einer Geländedarstellung können dies morphologische Strukturen des Geländes).
- ▷ Möglichkeit, zusätzliche Information zu berücksichtigen.

Im Folgenden werden einige Verfahren kurz vorgestellt.

Mit Maschen-Reduktion (*mesh-decimation*) wird eine Vereinfachung erreicht, indem die Anzahl der Knoten reduziert wird. Durch lokale Analyse der Geometrie und Topologie eines Knotens wird entschieden, ob dieser entfernt werden kann. Die vereinfachte Darstellung setzt sich somit immer aus einer Teilmenge der ursprünglichen Knotenmenge zusammen. Kriterium für die Elimination eines Knotens sind bestimmte Distanz- oder Krümmungswerte, z.B. die Distanz des Punktes zu einer mittleren Ebene, die durch seine Nachbarn gelegt ist. Iterativ wird der Knoten entfernt, der den kleinsten Fehler (geringste Distanz) produziert. Nach seiner Elimination muss die Lücke neu trianguliert werden. Mehrere Durchläufe sind nötig, da durch die Elimination eines Punktes neue Gegebenheiten im Netz entstehen. Weil sich die Fehler immer auf die jeweils aktuelle Zustandsänderung beziehen, ist es auch nicht direkt möglich, ein genaues globales Fehlermaß anzugeben, lediglich Approximationen lassen sich ermitteln (z.B. im Programmpaket Jade [Cianpalini et al. 1997]). In der entstehenden Baumstruktur wird jedes Dreieck durch zwei Maße charakterisiert: Die Fehlermaße zu seiner Entstehungszeit und zu der Zeit, wo es sich weiter unterteilt in seine Nachfolger. Mittels dieser Kriterien lässt sich eine maßstabsabhängige Darstellung ableiten, aus der jede beliebige Auflösung ermittelt werden kann. In diesem Verfahren kann leicht eingeführt werden, ob ein Knoten bzw. signifikante Kanten erhalten bleiben sollen. Auf diese Weise kann Zusatzwissen über die Objekte integriert werden.

Hierarchische Triangulierungsverfahren können auch durch Maschen Verfeinerung (*mesh-refinement*) generiert werden. Diese Verfahren starten mit einer geringen Auflösung der Oberfläche, in die sukzessive Knoten eingeführt werden, so lange, bis ein vorgegebener Approximationsfehler, bzw. die höchste Auflösung, erreicht ist. Diese Beschreibung stellt zugleich eine Mehrfachrepräsentation dar, indem sie die verschiedenen Levels of Detail in einer Baumstruktur verwaltet [DeFloriani & Puppo 1995]. Hier lässt sich auch ein exaktes Fehlermaß für eine entsprechenden Repräsentation angeben.

Eine Optimierung der Maschen (*mesh-optimization*) ist Grundlage des Verfahrens von Hoppe, DeRose, Duchamp, McDonald & Stuetzle [1993]. Lokal wird eine Vereinfachung erreicht, indem Knoten verschoben oder zusammengefasst werden bzw. Kanten unterteilt oder ausgetauscht werden. Das Kriterium für eine dieser möglichen Transformationen ist der geringste Anstieg einer lokalen Energiefunktion. Dieses Verfahren wurde zu einer maßstabsabhängigen Darstellung erweitert, welche es ermöglicht, dass kontinuierlich Details in einer Auflösung hinzugenommen werden können [Hoppe 1998]. Zusätzlich ist eine selektive Verfeinerung möglich, indem ein Objekt nicht mit einem festen Level of Detail betrachtet wird, sondern unterschiedliche Auflösungen innerhalb eines Objekts genutzt werden können (Lupen-Effekt). Auch hier kann Zusatzinformation eingebracht werden, in Form von Eigenschaften, die es zu erhalten gilt.

Eine weitere Art von Verfahren entfernt Punkte, die nah benachbart sind; sie werden auch als *Vertex Clustering* bezeichnet. In einem hierarchischen Ansatz werden sukzessive Knoten zu Clustern zusammengefasst und in einer Baumstruktur bottom-up abgelegt. Zu Beginn stellt jeder Dreiecksknoten ein Cluster dar. Jeweils benachbarte Cluster werden aggregiert. Dieser neue Knoten im Baum wird charakterisiert durch einen Repräsentanten (z.B. den mittleren Punkt) und ein Qualitätsmaß – die maximale Distanz zwischen den zugehörigen Clusterrepräsentanten. Die zusammengefasste Struktur muss noch bereinigt werden, da ursprüngliche Polygone zu Linien oder Punkten kollabieren können. Die Wurzel des Baumes bildet schließlich ein Cluster, welches alle Objekt enthält. Diese Baumstruktur kann für die effiziente Darstellung der LOD's genutzt werden. Eine LOD ist durch einen Approximationsfehler gekennzeichnet. Um nun diesen LOD zu erzeugen, werden im Baum diejenigen Cluster dargestellt, welche diesem Approximationsfehler entsprechen – Knoten mit höherer Genauigkeit brauchen somit nicht dargestellt zu werden [Schauffler & Stürzlinger 1995]. In einer Variante dieses Ansatzes wurde der Baum inkrementell kodiert, d.h. nur die Differenzen zur vorherigen Repräsentation werden gespeichert, wodurch eine extrem kompakte Darstellung ermöglicht wird (Speicherersparnis bis zu 30 % der ursprünglichen Darstellung) [Schmalstieg 1997].

Eine Reduktion auf einen eindimensionalen Fall wird von [Jiang & Bunke 1994] vorgeschlagen: ein Distanzbild (Oberfläche) wird in homogene Teile segmentiert, indem eine Linienglättung bezüglich jeder Zeile des Tiefenbildes durchführt, und damit eine zeilenweise Segmentierung erreicht wird. Benachbarte Linien, die zur gleichen Ebene gehören, werden anschließend zusammengefasst. Dieses Verfahren wurde zur Segmentierung von Tiefenbildern entwickelt.

Zur Darstellung von Geländeoberflächen wurde von Sayda [1999] folgende Vorgehensweise gewählt: zunächst wird das Gesamtgebiet in einzelne Teile unterteilt. Diese werden jeweils separat vereinfacht mittels Maschenreduktion. Für die Visualisierung werden anschließend innerhalb des sichtbaren Bereiches zunächst die Teile ausgewählt, die dann – entsprechend ihrer Entfernung vom Beobachter – in einer angemessenen Auflösung visualisiert werden. Ein Problem stellte hier die Übergänge an den Grenzen der Untergebiete dar; es wurde gelöst, indem die Gebietsgrenzen als zu erhaltende Objekte in die Vereinfachung einbezogen wurden.

Ein Problem bei diesen rein geometrisch arbeitenden Verfahren ist die Berücksichtigung von Semantik: ein Objekt kann ein geometrisch kleines Detail sein, das für den Gesamtzusammenhang von großer Bedeutung ist (Beispiel: der Türgriff eines Autos, die Spitze eines Gabelstaplers, ein Kirchturm in einer Stadt). Die Integration von Semantik ist jedoch auch hier in gewisser Weise möglich. Ein Beispiel für eine topographische Anwendung skizziert Misund [1996] (vergleiche auch [DeFloriani & Magillo 1997]): eine Darstellung eines Flussgebiets erfordert eine hochdetaillierte Repräsentation in der Nähe des interessierenden Objektes während diese in größerer Entfernung gröber sein darf. Auf diese Weise kann eine kontext- bzw. objektabhängige Darstellung ermittelt werden, die als Vario-Scale bezeichnet wird. Sie lässt sich mit einer GIS-Kartendarstellung vergleichen, die auf eine bestimmte Thematik fokussiert und diese in der Darstellung gegenüber unwichtigem hervorhebt. Dies entspricht dem anisotropen Filtern, welches in der Bildverarbeitung angewandt wird.

Grundsätzlich basieren die Verfahren jedoch auf geometrisch-topologischen Strukturen. Diese gehen auch als Kriterien in die Reduzierung bzw. Vereinfachung mit ein. Dies geschieht üblicherweise durch eine lokale Analyse der Situation (einer Masche). Damit ist eine globale Steuerung a priori nicht vorgesehen. Es existieren jedoch Verfahren zur Integration von Zusatzbedingungen zur Erhaltung bestimmter Größen (Kante, Punkt, Diskontinuität, Normale, Attribut (z.B. Farbe)).

Im Folgenden werden zwei Verfahren vorgestellt, welche hierarchische Datenstrukturen für die Visualisierung einsetzen, wobei es hier nicht um 2.5D-Oberflächen, sondern um echte 3D-Objekte geht.

3.2.1.2 Objektbezogene Fassadengeneralisierung

Eine Möglichkeit, eine objektbezogene Vereinfachung durchzuführen, wurde von Klein [1999] untersucht [Sester & Klein 1999]. Um Gebäude mit reich strukturierten Fassaden maßstabsabhängig darzustellen, ist es nötig, objektbezogen zu generalisieren: nur so können wichtige, objektspezifische Details auch entsprechend wiedergegeben werden, was für den Wiedererkennungseffekt sehr wichtig ist.

Im Gegensatz zu rein kontinuierlichen Oberflächenvisualisierungen, die auf Maschenvereinfachung beruhen, können strukturierte Objekte nicht rein aufgrund ihrer Geometrie generalisiert werden. Hier sind – wie im Falle der topographischen GIS-Daten – spezielle objektspezifische Regeln zu definieren. Hierzu wurde ein Satz von Generalisierungsregeln aufgestellt, welche bestimmen, wie sich die Objekte einer Fassade in unterschiedlichen Abständen (Maßstäben) zeigen. Diese Regeln orientieren sich an den kartographischen Generalisierungsregeln (vgl. Kapitel 4.3.1) und wurden durch empirische Untersuchungen bestimmt.

Die verschiedenen, automatisch abgeleiteten Darstellungen wurden in der 3D-Beschreibungssprache VRML (Virtual Reality Modeling Language) repräsentiert. VRML erlaubt prinzipiell die Beschreibung eines Objektes in unterschiedlichen Auflösungsstufen (Levels of Detail). Hierfür ist eine spezielle Struktur vorgesehen: abhängig von der Distanz des Beobachters vom Objekt werden unterschiedliche Objektrepräsentationen verwendet. Diese Repräsentationen müssen aber explizit vorgegeben werden, d.h. es existiert kein Mechanismus, welcher diese selbständig erzeugen würde. In diesem Falle wurden sie durch das Regelwerk ermittelt. Abbildung 3.4 zeigt verschiedene Levels of Detail in *einer* Darstellung. Entsprechend der Entfernung von den Gebäuden werden deren Details unterschiedlich dargestellt. Dies ist gut beim Vergleich des Gebäudes im Vordergrund mit den identischen, weiter im Hintergrund liegenden, Gebäuden zu beobachten: Strukturen werden vereinfacht, zusammengefasst, betont und reduziert.

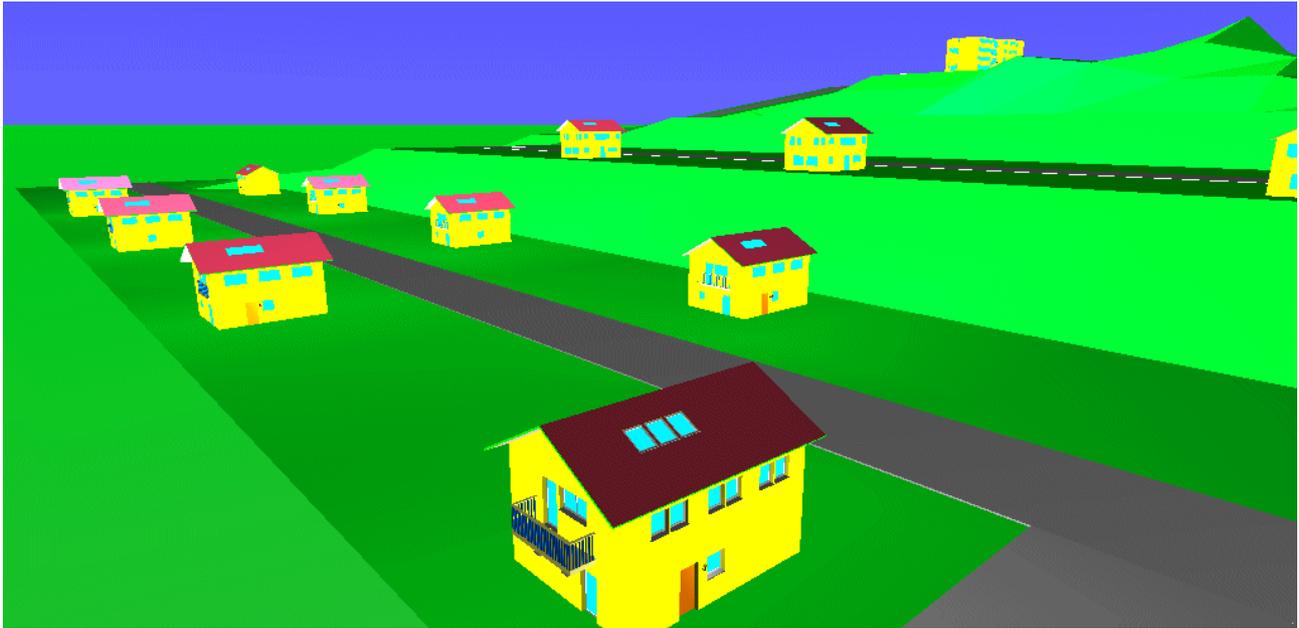


Abbildung 3.4: Ansicht einer Wohnsiedlung mit mehreren gleichartigen Gebäuden – jeweils aus unterschiedlichen Abständen betrachtet, und daher in unterschiedlichen LOD's dargestellt.

3.2.1.3 Objektbezogene Gebäudegeneralisierung

Für die Darstellung von 3D-Gebäudestrukturen entwarfen Kofler & Gruber [1998] eine spezielle Datenstruktur als Kombination von R-Baum [Samet 1990] und Level of Detail-Ansatz. Während im konventionellen R-Baum die Objekte in den Blättern abgebildet sind [van Oosterom 1990], wurde hier auch ein Objektverweis in den Knoten realisiert. Auf diese Weise können in den Zwischenebenen des Baumes aggregierte, vereinfachte Gebäudestrukturen abgebildet werden. Auf oberster Ebene ist beispielsweise ein Modell einer gesamten Stadt in geringer Auflösung gegeben (DTM mit überlagertem Luftbild), darunter sind die einzelnen Bezirke abgebildet, die sich in Häuserblöcke unterteilen, welche wiederum – auf der untersten Ebene – aus einzelnen, hoch detaillierten Gebäudemodellen bestehen [Kofler 1998]. Die einzelnen Repräsentationsebenen wurden vorab generiert und in die Datenstruktur integriert. Diese Datenstruktur wurde in dieser Anwendung für die schnelle Visualisierung eingesetzt, sind kann jedoch auch Grundlage sein für eine effiziente Datenanalyse.

3.3 Zusammenfassung

In der Bildanalyse und zur Darstellung und Verarbeitung von Oberflächen werden hierarchische Verfahren eingesetzt. Diese dienen zur Reduktion der Komplexität, zur schnellen Visualisierung, aber auch zur Unterstützung von Analyseoperationen. Die elementarste Einheit in Oberflächenmodellen ist eine Dreiecksmasche, alle Maschen zusammen bilden das Objekt. Die elementarste Einheit in Bildern ist ein Pixel mit seinem Grauwert – durch das Nebeneinander der Pixel entsteht der visuelle Eindruck. Die Verfahren zur Vereinfachung basieren daher primär auf Operationen, die auf geometrisch-topologischen Überlegungen und Kriterien beruhen. Die Semantik ist in diesen Repräsentationsformen meist implizit gegeben (z.B. in den Grauwerten der Bilder, oder der Farbe der Dreiecke). Daher wird sie meist auch nur indirekt berücksichtigt.

In GIS hingegen spielt die Semantik neben der Geometrie eine starke Rolle. Alle Operationen, die auf Geo-Objekten arbeiten, müssen also beide Komponenten berücksichtigen, d.h. eine Vereinfachung soll objektabhängig durchgeführt werden. Dies macht eine Übertragung der Ansätze, die in Bildern oder auf Oberflächen möglich sind, schwierig. Geht es rein um die Geometrie, so lassen sich manche Ansätze übertragen – die Maschenvereinfachungsverfahren ähneln beispielsweise den (1D-) Verfahren der Linienglättung (vgl. Mesh-Refinement und Douglas-Peucker-Algorithmus).

Grundsätzlich lassen sich allerdings die zugrundeliegenden Prinzipien analysieren, was Voraussetzung für eine

eventuelle Übertragung ist. Auch lassen sich die Möglichkeiten studieren, die für die einzelnen Repräsentationsformaten erreicht werden können. Hierzu zählt z.B. die Tatsache, dass maßstabsabhängige Darstellungen kompakt gespeichert werden können, indem nur Veränderungen zur vorhergehenden Stufe abgelegt werden. Weiterhin kann beobachtet werden, dass Maßstabsebenen verbunden werden können, wenn der Bezug zwischen den einzelnen Ebenen explizit bekannt ist. Für die Visualisierung bedeutet dies, dass ein realistisches Annähern an eine Situation simuliert werden kann – was dem logischen Zoomen entspricht. Wichtig ist, dass zwischen den Repräsentationen keine Sprünge auftreten, so dass die Übergänge immer nachvollziehbar bleiben.

4 Erzeugung, Verwaltung, Analyse und Präsentation mehrfachrepräsentierter Datensätze in Geo-Informationssystemen

4.1 Multiple Repräsentation – maßstabsabhängige Darstellung in GIS

Multiple Repräsentation in GIS beschäftigt sich mit der Erfassung, Speicherung, Verwaltung, Analyse und Präsentation räumlicher Objekte, welche die gleichen Realweltobjekte darstellen, in einem gemeinsamen Informationssystem. Diese unterschiedlichen Datenbestände resultieren aus verschiedenen Sichten auf die Realität – sie sind das Ergebnis unterschiedlicher Interpretationen der Realität. Die diversen Sichten ergeben sich aus unterschiedlichem thematischen Fokus, unterschiedlichem Maßstab, und unterschiedlichem Zeitpunkt der Datenerfassung.

Die Integration verschiedener Repräsentationen in einem System setzt voraus, dass die Verbindungen zwischen den Objekten der jeweiligen Darstellungen vorhanden sind, indem jedes Objekt mit seinem korrespondierenden Objekt des anderen Datensatzes verbunden ist. Handelt es sich um Datenbestände unterschiedlichen Maßstabs, so werden für die Verbindungen Generalisierungsoperationen benötigt.

Das Vorhalten einer Mehrfachrepräsentation in GIS erfordert Mechanismen, um unterschiedliche Datenbestände zu integrieren.

4.1.1 Integration verschiedener Datenbestände

Die zunehmende Verbreitung und Verfügbarkeit räumlicher Datenbestände erfordert Lösungsansätze, die es ermöglichen, verschiedene Datenbestände integriert zu verarbeiten, ohne dass sie vorher in ein System konvertiert worden sind. Unter dem Stichwort 'Interoperable GIS' bzw. OpenGIS [OGIS 1999],[McKee & Kuhn 1997] wird nach Methoden und Strategien gesucht, sowohl Daten als auch Operationen nach Bedarf integriert nutzen zu können. Das Nutzen von verteilten Datenbanken innerhalb eines föderierten Systems ist ein Problem, für welches bezüglich Standarddatenbanksystemen bereits Lösungen entwickelt wurden. Im Bereich der Föderation räumlicher Datenbestände kommen zusätzliche Probleme hinzu, welche in Laurini [1998] detailliert angesprochen werden.

Die Datenbestände können sowohl horizontal als auch vertikal fragmentiert sein. Horizontale Fragmentierung entspricht im Bereich der räumlichen Datenbestände der geographischen Unterteilung in einzelne räumlich zusammenhängende Gebiete, während die vertikale Fragmentierung der thematischen Untergliederung in verschiedene thematische Ebenen entspricht. Oft existieren beide Fragmentierungsarten auch zusammen. Dies führt dazu, dass Objekte unterschiedlicher Herkunft sich ganz oder teilweise überlappen – was sowohl die Geometrie als auch die Semantik betrifft. Desweiteren existieren Klaffungen bzw. fehlende Übereinstimmungen in den Randbereichen verschiedener Datensätze.

Während geometrische Unterschiede zum Teil auf Messfehler oder unterschiedliche Erfassungsmethoden zurückzuführen sind, resultieren semantische Unterschiede aus unterschiedlichen Datenmodellen. Eine Straße kann beispielsweise in einem Datenbestand als linienhaftes Objekt modelliert sein, während sie im anderen ein flächenhaftes Flurstück darstellt. Weitere Schwierigkeiten bei der Integration liegen auch in unterschiedlichen Datenstrukturen (Raster – Vektor, Grid, TIN).

Nach Devogele et al. [1998] sind zur Integration verschiedener Datenbestände in eine gemeinsame Struktur folgende Integrationsschritte zu befolgen:

Schema-Vorbereitung betrifft die Transformation der unterschiedlichen Datenbestände in ein einheitliches Muster. Dies betrifft die Abstimmung bezüglich eines einheitlichen Referenzsystems, eines einheitlichen Formats (Raster – Vektor), aber auch eines einheitlichen Datenbanksystems.

Untersuchung der Zuordnung auf Datenbank- und Objektebene: Hier wird festgestellt, welche korrespondierenden Objektklassen existieren, sowie, welche Relationen sie teilen. Dies können die typischen Relationen wie Identität, Teilmenge, Schnitt, etc. sein. Weiterhin wird festgelegt, wie die Objektinstanzen ineinander überführt werden können. Dies kann z.B. durch Verschneidungs-, Inklusions- oder Puffer-Operationen beschrieben werden.

Integration: sind die jeweiligen Konzepte in den jeweiligen Datenmodellen gefunden und ihre Beziehungen identifiziert, so können sie im Integrierten Schema zusammengeführt werden.

Die Zuordnungen auf semantischer Ebene lassen sich zum einen durchführen, wenn eine eindeutige Bezeichnung der Objekte in beiden Systemen vorliegt (etwa eine eindeutige Objekt-ID). Dies ist allerdings üblicherweise nicht der Fall. Typisch ist, dass beispielsweise in einem Datensatz lediglich Verkehrswege spezifiziert werden, während in einem anderen Datensatz eine detaillierte Unterteilung in einzelne Fahrbahnen, Radwege und Gehwege erfolgt. Die semantische Zuordnung dieser Begriffe lässt sich anhand von abstrakten Beschreibungen der Objekte einer Sicht auf die Realität und ihren jeweiligen Beziehungen zu den jeweiligen Anwendungsbereichen formulieren. Über Ontologien lassen sich spezifische Sichten auf die reale Welt beschreiben. Mit Ontologie wird eine 'strukturierte, abgeschlossene Sammlung von eindeutig definierten Konzepten' bezeichnet [Uitermark, van Oosterom, Mars & Molenaar 1999], die auch als 'Vokabular' eines Datenmodells angesehen werden kann. Sie stellt die Strukturen bereit, aus welchen sich die Konzepte zusammensetzen – was hier nicht definiert ist, existiert auch nicht. Durch Abstraktionsregeln (Relationen) können mehrere individuelle Spezifikationen verbunden werden. Im Straßenbeispiel könnte ein Datenmodell beispielsweise die Straße mit vielen Details beschreiben. Diese detaillierten Konzepte stehen dann in einer Aggregationsbeziehung zum abstrakten Domänenkonzept der Realität, dem Straßenverkehr. Verweisen zwei Konzepte auf das gleiche Konzept der abstrakten Repräsentation der realen Welt, so gelten sie als semantisch ähnlich.

Nachdem die semantische Ähnlichkeit identifiziert ist, können korrespondierende Objekte durch geometrische Zuordnung gefunden werden.

4.1.2 Maßstabsabhängige Darstellungen

Stell & Worboys [1998] zielen auf ein integriertes formales Modell für maßstabsabhängige Darstellungen. Sie stellen dazu eine Theorie von Generalisierung und maßstabsabhängiger Darstellung vor, die neben der Integration von semantisch und geometrisch heterogenen Datensätzen auch die Korrektheit des Generalisierungsprozesses formal zu studieren erlaubt. Damit wird insgesamt ein theoretischer Rahmen bereitgestellt, in welchem Generalisierungsoperationen erfolgen können. Allerdings – und das betonen die Autoren auch – ist keine praktische Umsetzung gegeben.

Devogele et al. [1996] definieren eine maßstabsabhängige Datenbank als eine Struktur, welche erlaubt, das gleiche Realweltobjekt in unterschiedlichen Stufen der Präzision, Genauigkeit und Auflösung darzustellen. Das Vorhalten von mehreren Repräsentationen in unterschiedlichen Maßstäben kann auf verschiedene Arten erfolgen. Die verbreitetste Art ist das Nebeneinander von Kartenserien, wie sie die Landesvermessungsverwaltungen bereitstellen. Diese Karten stehen in vorgegebenen Maßstäben zur Verfügung und werden üblicherweise separat und unabhängig voneinander erfasst und auch fortgeführt.

Eine solches maßstabsabhängiges Schema kann sich auf verschiedene Arten darstellen:

1. Maßstabslose Darstellung – Kontinuierlicher Maßstab:

Eine Idealvorstellung ist das Vorhandensein eines einzigen, hochdetaillierten Datenbestandes, aus dem mittels Abstraktions- und Generalisierungsverfahren jede beliebige Auflösung erzeugt werden kann (Abbildung 4.1, links). Diese Darstellung ist mit der der Scale-Space-Bildpyramide vergleichbar. Sie setzt natürlich voraus, dass effiziente Algorithmen existieren, um diese Generalisierung durchzuführen.

2. Vorhalten separater Datenbestände:

Datenbestände unterschiedlicher Auflösung können nebeneinander vorgehalten werden, ohne dass die Objekte miteinander verbunden sind (Abbildung 4.1, Mitte). In einigen GIS-Produkten, z.B. ArcView lässt sich beispielsweise angeben, in welchem Maßstabsbereich (hier abgeleitet aus dem Verhältnis zwischen Realität und Bildschirmdarstellung) Objekte angezeigt werden. Die Verbindung zwischen den Maßstäben ist hier lediglich implizit über die gemeinsame Geometrie gegeben. Diese Realisierung erlaubt somit lediglich einen Wechsel der Geometrieebene, sobald ein bestimmter Maßstab überschritten wird, d.h. es ist kein objektspezifischer Maßstabswechsel möglich.

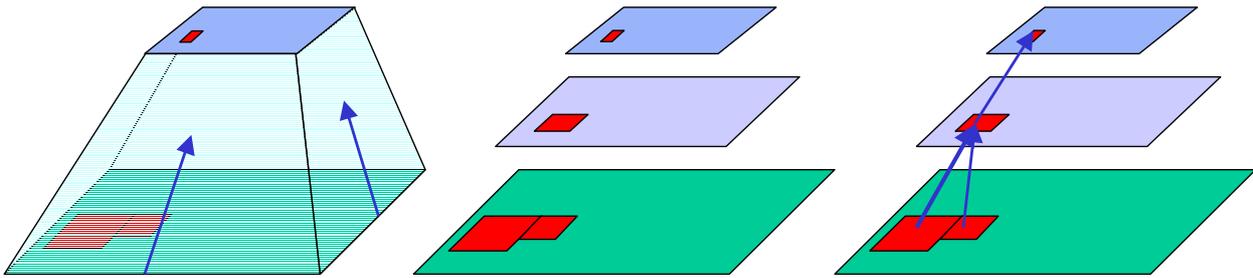


Abbildung 4.1: Verschiedene Möglichkeiten der maßstabsabhängigen Darstellung.

3. Separate diskrete Auflösungsebenen – explizite Verbindung homologer Objekte

Diese Möglichkeit stellt eine Kombination dar, indem diskrete Maßstäbe separat vorgehalten werden, sie jedoch miteinander verbunden sind (Abbildung 4.1, rechts). Diese Verbindung erfolgt objektweise, indem Objekte, die zum selben physikalischen Objekt gehören, gegenseitig verzeigert sind. Der Vorteil dieser Art der Integration ist, dass hiermit existierende Datensätze, genutzt werden und somit mehrfach wiederverwendet werden können.

Während im zweiten Fall ein Zusammenhang zwischen den Objekten in unterschiedlichen Auflösungen rein geometrisch bestimmt ist (durch Überlagerung bzw. Verschneidung), sind diese Beziehungen im letzten Fall explizit. Auch im ersten Fall ist sie gegeben, indem die Repräsentation mittels Generalisierungsregeln direkt in den Nachbarmmaßstab verfolgt werden kann.

Aufgrund fehlender Verfügbarkeit effizienter Generalisierungsmechanismen [Müller, Weibel, Lagrange & Salge 1995], ist derzeit die dritte Lösung zu favorisieren. Das Zusammenführen von Datenbeständen in einem derartigen multiplen Repräsentationsschema erfordert eine formale Beschreibung der Verbindungen zwischen den Objektbeschreibungen der verschiedenen Maßstabsebenen. Diese Verbindungen sind als gegenseitige Verweise der Objekte zu modellieren, so dass Übergänge in beiden Richtungen möglich sind. Diese Verbindungen sind Relationen unterschiedlicher Kardinalität (1:1, 1:n, n:1, n:m); weiterhin können Objekte unterschiedlichen Typs verbunden werden (z.B. Punkt mit Fläche). Aufgrund dieser Verbindungen ist es zum einen möglich, Änderungen zwischen den Repräsentationsformen zu übertragen, und damit Daten fortzuführen; zum anderen können damit auch neue Daten abgeleitet werden – wenn die Verbindung als Generierungsvorschrift angesehen wird [Kilpeläinen 1992]. Somit beschreiben sie nicht nur die Beziehungen, sondern beinhalten darüberhinaus auch noch Abbildungsvorschriften – unter anderem auch Generalisierungsvorschriften [Devogele et al. 1996]. Die Verbindungen sind insbesondere von großer Bedeutung, um die Konsistenz der Datensätze zu gewährleisten [Müller 1991], indem damit die Möglichkeit gegeben ist, Fortführungen immer direkt auf alle Folgemaßstäbe zu propagieren.

Die Frage stellt sich, wie diese Verbindungen zwischen den Objekten der einzelnen Ebenen hergestellt werden können. Zunächst sind die maßstabsbezogenen Beziehungen zwischen den Objektschemata zu klären. Nach dem Offenlegen dieser Korrespondenzen können Objektinstanzen über semantisches, geometrisches oder topologisches Matching einander zugeordnet werden, um somit explizite Verbindungen herzustellen.

Mögliche Verfahren zu deren Erzeugung sind (vgl. z.B. [Sester, Anders & Walter 1998]):

1. Herstellen der Verbindungen von Hand,
2. geometrisch-topologisches Matching,
3. Vorgabe bekannter Regeln, die die Beziehung beschreiben, bzw. Ableitung von Maßstabübergangsregeln aus gegebenen Beispielen mittels Maschinellen Lernen,
4. Nutzen bekannter mathematischer Beziehungen zwischen den Datenebenen und Objekten.

Zu 1 Eine manuelle Verbindung verschiedener Maßstäbe führt zu Erkenntnissen bezüglich der Kardinalitäten und Typen der möglichen Beziehungen. Timpf [1998] untersuchte die Repräsentation gleicher Objekte in

verschiedenen Maßstäben. Primäres Ziel war dabei die Identifikation der Relationen zwischen den Objekten der Datenbestände. Idealerweise erfolgt von der detaillierten Darstellung hin zur groben lediglich eine Aggregation, d.h. es liegt eine streng hierarchische Beziehung vor. Sie beobachtete allerdings auch Datensätze, wo ein Objekt der detaillierten Ebene zu mehreren Objekten der gröberen Ebene gehört. Solche Darstellungen können durch Typifizierungen, aber auch aufgrund unterschiedlicher Datenmodelle, leicht entstehen. Ähnliche Beobachtungen machte auch Gabay [1997] in seinen Untersuchungen zu den Beziehungen zwischen dem ALK¹- und dem ATKIS[Amtlich Topographisches-Kartographisches Informationssystem (ATKIS) 1988] 25-Datenbestand. Im Fall der strengen hierarchischen Beziehung sollten zwischen ATKIS, der generelleren Darstellung, und ALK, dem detaillierteren Datenbestand, lediglich 1:n-Beziehungen auftreten. Folgende Abbildungen zeigen jedoch, wie zwischen Straßenobjekten der beiden Datenbestände zum einen eine n:1-Beziehung (Abbildung 4.2), aber auch eine n:m-Beziehung vorkommen kann (Abbildung 4.3).

Zu 2 Wird vorausgesetzt, dass zwischen den Datensätzen lediglich geometrische Unterschiede bestehen, so können für die Bestimmung korrespondierender Objekte Verfahren des *Conflation* eingesetzt werden [Rosen & Saalfeld 1985], [Saalfeld 1988]. Hierunter versteht man Abbildungen, welche sich nicht als reine geometrische Abbildung verstehen lassen [Laurini & Thompson 1999]. Es werden daher primär Unterschiede zwischen den Datensätzen auftreten, die durch unterschiedliche Datenmodelle oder unterschiedliche Erfassung entstanden sind, jedoch weitestgehend ähnliche Geometrie aufweisen.

Üblicherweise werden solche Verfahren genutzt, um Datensätze hoher thematischer Auflösung mit solchen hoher geometrischer Auflösung zusammenzubringen, damit also die Attribute des einen Datensatzes mit der Geometrie des zweiten zu verbinden (z.B. [Smith & Petermann 1996], [Tomaselli 1994]). Auch in der Arbeit von [Gabay & Doytsher 1995] steht im Vordergrund, die Qualität eines Datenbestandes durch Verbindung mit einem weiteren zu erhöhen. In Walter & Fritsch [1999] werden Straßendaten unterschiedlicher Herkunft miteinander verbunden. Aufgrund der großen topologischen Unterschiede der Datensätze wurde hierfür nicht nur die Geometrie der Objekte berücksichtigt, sondern auch noch der Kontext. Mittels einer relationalen Zuordnung wurden schließlich die Verbindungen zwischen Elementen der Datensätze bestimmt.

Auch Datenbestände unterschiedlichen Maßstabs können mittels geometrischer Überlagerung analysiert werden. Uitermark, van Oosterom, Mars & Molenaar [1998] überlagern Gebäudedaten und untersuchen die Kardinalitäten und Typen der jeweiligen Zuordnungen. Dies setzt voraus, dass eine semantische Integration bereits vorab erfolgt ist, und somit auch sinnvoll korrespondierende Objekte miteinander verglichen werden [Devogele et al. 1998].

Zu 3 Die Übergänge zwischen Datenbeständen können auch als Regelwerk formuliert werden, Voraussetzung ist hier, dass die Zusammenhänge bekannt sind und sich formalisieren lassen. Beispiele im Zusammenhang mit maßstabsabhängiger Darstellung werden in Kapitel 4.3.4 gegeben.

Oft sind solche Zusammenhänge allerdings nicht a priori bekannt. Hier können Techniken des Maschinellen Lernens eingesetzt werden, um diese aus bekannten Beispielen abzuleiten. Als Beispiele können existierende Maßstabsserien benutzt werden [Meng 1998], [Sester 1999a] (vgl. auch Kapitel 4.3.4.3).

Zu 4 Lassen sich die Verbindungen über bekannte mathematische Beziehungen beschreiben, so können daraus die entsprechenden Repräsentationen ineinander überführt werden. Ein Beispiel hierfür ist die Formvereinfachung mittels Glättungsoperatoren.

Prinzipiell können in ein solches Schema Objekte unterschiedlicher geometrischer und semantischer Abstraktion abgebildet werden, sie können sich aber auch bezüglich der zeitlichen Komponente unterscheiden. Diese Integration sollte erfolgen, ohne dass Redundanzen oder Inkonsistenzen eingeführt werden [Kidner & Jones 1994]. Letzteres kann mittels spezieller Mechanismen gewährleistet werden [Egenhofer, Clementini & Felice 1994].

Für die Modellierung und Speicherung der erforderlichen komplexen Strukturen eignet sich das objekt-orientierte Datenmodell. Hiermit lassen sich die räumlichen Modelle zusammen mit ihren topologischen Relationen und hierarchischen Beziehungen ablegen. Leung, Leung & He [1999] beschreiben, wie in ein solches Modell auch maßstabsabhängige Repräsentationen abgebildet werden können.

¹Automatisierte Liegenschaftskarte



Abbildung 4.2: Zugeordnete Objekte in gelb markiert: Objekt im ATKIS-Datenbestand (links), zugeordnete Objekte der ALK (rechts): kurzes Straßenobjekt aus ATKIS wird dem gesamten Straßenflurstück der ALK zugeordnet ($n:1$).



Abbildung 4.3: Zugeordnete Objekte in gelb markiert: Objekt im ATKIS-Datenbestand (links), zugeordnete Objekte der ALK (rechts): Straßenobjekt in ATKIS hat verschiedene Entsprechungen im ALK-Datenbestand ($n:m$) (aus [Gabay 1997]).

Mit zunehmender Verfügbarkeit von Generalisierungstechniken wird es möglich sein, immer weniger Daten explizit zu speichern, sondern sie bei Bedarf zu generieren. Kommen noch Methoden der Interpretation räumlicher Daten hinzu, so wird es in Zukunft möglich werden, gezielt einen Datenbestand zu erzeugen, so wie ihn die Applikation benötigt – ein 'data on demand'. Damit kann erreicht werden, dass Daten für eine bestimmte Anwendung in der angemessenen räumlichen, thematischen und zeitlichen Auflösung generiert werden – und nicht wie bislang praktiziert, die Möglichkeiten der Anwendung durch die Datenverfügbarkeit eingeschränkt sind.

4.2 Erzeugung von GIS-Datenbeständen durch direkte Erfassung

Im GIS entstehen die Daten aufgrund eines gegebenen Datenmodells, auf dessen Basis sie explizit erfasst werden. Dieses Datenmodell gibt vor, welche Objekte und welche Objekteigenschaften in die digitale Repräsentation

übernommen werden, und damit auch, welche ignoriert werden. Die damit entstehenden Repräsentationen stellen jeweils eine bestimmte Sicht auf die Realität dar. Hier tritt bereits die *Erfassungsgeneralisierung* auf – d.h. eine Fokussierung auf das Wesentliche des Problems. Aspekte des Objekts, die im Datenmodell nicht repräsentiert sind, werden auch nicht erfasst.

Diesen Prozess der expliziten Modellierung gibt es im Falle der Bildanalyse in dieser Weise nicht. Wenngleich die Auswahl eines Sensors auch eine Selektion beinhaltet, indem sie die radiometrischen und geometrischen Eigenschaften vorgibt und damit implizit eine Objektauswahl trifft. Durch den Sensor wird damit festgelegt, was mit dieser Sensorcharakteristik 'gesehen' werden kann und was nicht.

Üblicherweise werden die GIS-Datenbestände durch direkte Erfassung auf Basis eines vorgegebenen Datenmodells erzeugt. Hierbei werden die drei Schritte der externen, der konzeptionellen und der logischen Modellierung durchlaufen ([Bill & Fritsch 1991], [Worboys 1995], [Bartelme 1995], [Laurini & Thompson 1999]):

externes Modell: beschreibt den Ausschnitt der Realität, der für die gegebene Fragestellung relevant ist. Damit wird die Art der Objekte eingegrenzt und eine 'Sicht' auf die Welt definiert.

konzeptionelles Modell: Festlegung der Struktur dieser Objekte bezüglich thematischer, geometrischer und topologischer Aspekte.

logisches Modell: definiert die Struktur des Datenbanksystems.

Im konzeptionellen Modell werden die thematischen und geometrischen Aspekte des Objektes festgelegt. Entsprechend der späteren Nutzung sind verschieden reich strukturierte Datenmodelle einzusetzen (z.B. die Formale Datenstruktur (FDS) nach [Molenaar 1989]).

In der thematischen Modellierung werden die Objekteigenschaften festgelegt. Auf diese Weise lassen sich beispielsweise folgende Objekte beschreiben:

Straße: lineares Objekt

Attribute: Länge, Breite, Typ, Name, ...
Symbol, Farbe, ...

Flurstück: flächenhaftes Objekt

Attribute: Größe, Form, Nutzung, Eigentümer, ...
Symbol, Farbe, ...

Nach dieser Spezifikation können Daten erfasst werden, wobei dies manuell, semi-automatisch oder auch automatisch erfolgen kann. Jedes individuelle Objekt wird dabei mit seiner Geometrie und seinen vorgegebenen Attributen gemessen und registriert. Auf diese Weise bilden die Daten im GIS meist aus eine Sammlung von strukturierten Individual-Objekten, d.h. Objektinstanzen im objektorientierten Sinne. Der Zugriff auf das allgemeine Datenmodell ist möglich, wird üblicherweise jedoch nicht ausgenutzt. Meist liegt es auch nicht explizit vor, sondern implizit in den Erfassungsvorschriften (Objektartenkatalog). Oft ist es möglich, Default-Werte für bestimmte Objekteigenschaften vorzugeben; es wäre aber sinnvoll, diese generellen Objekteigenschaften nach jeder Erfassung und Fortführung aus den Objektinstanzen abzuleiten, und somit das Modell systematisch anzureichern. Diese Information könnte für die weitere Verarbeitung von großem Nutzen sein (z.B. mittlere Flächengröße, mittlere Straßenbreite, typischer Belag, ...).

GIS-Modelle können beispielsweise durch einen Objektartenkatalog vorgegeben sein. Dieser enthält die Definition der zu erfassenden Objekte, wobei Geometrie, Thematik und Relationen zwischen den Objekten beschrieben werden. ATKIS [*Amtlich Topographisches-Kartographisches Informationssystem (ATKIS) 1988*] wird in drei Maßstabbereichen separat erfasst, daher liegen auch drei Objektartenkataloge vor. In Tabelle 4.1 ist die Beschreibung der Objektart 'Industrie und Gewerbefläche' in den beiden Landschaftsmodellen DLM25 und DLM250 wiedergegeben. Nach dieser Erfassungsvorschrift können die Objekte entweder direkt vor Ort erfasst werden, oder indirekt mittels Auswertung von Luftaufnahmen. Letzteres ist im Falle von ATKIS die gängige Vorgehensweise.

| Objektart 2112 Industrie- und Gewerbefläche – Allgemeine Angaben zur Objektart | |
|---|--|
| DLM25 | DLM250 |
| Definition: Eine baulich geprägte Fläche, die ausschließlich oder vorwiegend der Unterbringung von Gewerbe- und Industriebetrieben dient. Dazu zählen z.B. auch Einkaufszentren, Lager/Depots, großflächige Handelsbetriebe, Ver- und Entsorgungsbetriebe, Messeeinrichtungen. Die Grenze zwischen einer Industrie- und Gewerbefläche und benachbarten Flächen wird in der Regel durch die Grenzen der bebauten Grundstücke unter Einbeziehung der Hofraumflächen gebildet. | |
| Erfassungskriterium: | |
| <ul style="list-style-type: none"> ▷ vollzählig ▷ GN wird insbesondere bei den Flächen belegt, die sich außerhalb der Ortslage befinden. | <ul style="list-style-type: none"> ▷ Fläche > 10 ha ▷ GN wird insbesondere bei den Flächen belegt, die sich außerhalb der Ortslage befinden. Sind Objekte 'Wohnbaufläche' des DLM25 mit Objekten 'Industrie- und Gewerbefläche' zusammenzufassen, wird GN und ZN vom Objekt 'Wohnbaufläche' übernommen. |
| Objekttyp: flächenförmig | |
| Besondere Objekt- und Objektteilbildungsregeln: keine | |
| Name: GN Geographischer Name — Eigenname insbesondere bei Objekten außerhalb der Ortslage ZN Zweitname KN Kurzbezeichnung | |
| Attribute der Kategorie 1: | |
| BEB: Offene Bebauung: 1000 offen 9997 Attribut trifft nicht zu FKT: Funktion: 1101 Industrie und Gewerbe 1104 Einkaufszentren 1105 Lager 1106 Handel und Banken 1107 Dienstleistung 1213 Versorgung 1214 Entsorgung 1515 Kommunikation 9999 sonstige HBI: Höhe der Industriebebauung: 1100 niedrige Bebauung (0-12m) 3100 hohe Bebauung (12-24m) 4100 Hochhausbebauung (über 24 m) | BEB: Offene Bebauung: 1000 offen 9997 Attribut trifft nicht zu FKT: Funktion: 1101 Industrie und Gewerbe 1104 Einkaufszentren 1105 Lager 1107 Dienstleistung 1213 Versorgung 1214 Entsorgung 1515 Kommunikation 9999 sonstige |
| Attribute der Kategorie 2: OFT Oberflächenmaterial — TOPIS-Spezifikation | |
| Attribute der Kategorie 3: BWD Bauwerksdichte — Zahl der Bauwerke pro qkm DBD Dachbedeckungsdichte — Dachbedeckung innerhalb des Objektgebietes in % HNN Höchster Punkt — Höhe über NN in m VOH Vorherrschende Objekthöhe — tatsächlicher Wert in m | |

Tabelle 4.1: Gegenüberstellung der Erfassungsrichtlinien von Industrie und Gewerbefläche im DLM25 und DLM250.

Als wichtiger Unterschied zwischen den beiden Modellen ist das Erfassungskriterium zu sehen, welches im Falle des DLM250 eine Mindestfläche von 10 ha erfordert, während es im DLM25 alle Gebiete umfasst. Weiterhin unterscheiden sich die Kataloge in der Reichhaltigkeit der Attribute. Diese Vorschriften beschreiben, wie die individuellen Maßstäbe (Digitalen Landschaftsmodelle - DLM) jeweils separat erfasst werden müssen. Sie geben jedoch nicht an, wie sie auseinander abgeleitet werden können.

Im Entwurf für den Objektartenkatalog des DLM50 sind solche Generalisierungsregeln beschrieben:

Grundsätzlich werden die Objektarten 2112, 2114 und 2116 der Objektgruppe 'Baulich geprägte

Flächen' unabhängig von ihrer Größe erfaßt. Ein Objekt 'Siedlungsfläche' entsteht bei Generalisierung aus dem Basis-DLM (früher DLM25) aus einem oder mehreren Objekten 'Wohnbaufläche' und 'Fläche gemischter Nutzung'.

Ähnliche Regeln existieren für die Behandlung von Straßen:

Vollzählige Erfassung der für den öffentlichen Verkehr zugelassenen Straßen (Ausnahme: Gemeindestraße) sowie Erfassung von militärischen Straßen und Privatstraßen, die der Erschließung von Siedlungs- oder Betriebsflächen dienen.

Bei den Gemeindestraßen innerhalb von Ortslagen wird eine Auswahl (ca. 50%) entsprechend der Bedeutung für den innerörtlichen Verkehr getroffen.

Um solche für den Menschen erstellten 'Regeln' auf ein Computersystem zu übertragen, werden Generalisierungsalgorithmen benötigt. Diese werden im Folgenden ausführlich beschrieben.

4.3 Erzeugung von GIS-Datenbeständen durch Generalisierung

In der Generalisierung unterscheidet man die Modellgeneralisierung und die kartographische Generalisierung. Bei der ersteren, die auch als Datenbank-Generalisierung (Datenbank Abstraktion) bezeichnet wird, soll primär ein reduzierter Datensatz erzeugt werden, welcher späteren Analyseaufgaben (und Präsentationen) als Grundlage dient. Die kartographische Generalisierung fokussiert dagegen auf die visuelle Präsentation der räumlichen Situation. Hier kommen noch weitere Gesichtspunkte hinzu, die durch das visuelle System und die Wahrnehmungsmechanismen des Menschen gesteuert sind: graphische Mindestgrößen müssen eingehalten werden. Dies kann dazu führen, dass Objekte nicht in ihrer originären Gestalt und Position wiedergegeben werden können, sondern vereinfacht, betont oder verdrängt werden müssen. Beim Maßstabsübergang muss geklärt werden, ob ein Implantations-Wechsel [Bertin 1974] durchgeführt wird, der auch meist eine neue Begriffsbildung nach sich zieht, oder ob die Repräsentation beibehalten wird, welche allerdings vereinfacht werden muss. Im ersten Fall spricht man von begrifflicher Generalisierung – ein Beispiel ist der Übergang von 'Baum' zu 'Wald'. Im zweiten Fall handelt es sich um eine strukturelle Generalisierung .

Ausgelöst wird die Generalisierung durch den Maßstab und durch den Zweck der Karte. Ziel ist es, ein Maximum an relevanter Information zu vermitteln, und dabei den Inhalt und die graphische Präsentation eines räumlichen Sachverhalts derart aufzubereiten, dass die Nutzbarkeit und die Lesbarkeit gewährleistet ist. Nutzbarkeit ist dabei immer bezüglich einer konkreten Anwendung definiert und beinhaltet auch die Handhabbarkeit. Letztere bezieht sich primär auf die Größe der Karte – kann aber direkt auch auf die Größe und die Zugriffsmechanismen digitaler Datenbestände im Rechner bezogen werden.

Modellgeneralisierung erfordert demnach eine Abstraktion der Objekte in einer Datenbank, während die Kartographische Generalisierung darüber hinaus noch die Visualisierung der Objekte umfasst.

Generalisierung wurde von jeher von Kartographen auf der Basis einer Fülle von Regeln und Vorschriften, aber auch unter Berücksichtigung künstlerischer Aspekte, durchgeführt. Dies ist ein höchst subjektive Prozess, was unter anderem auch dazu führt, dass das Ergebnis einer Generalisierung immer (leicht) unterschiedlich ist – selbst wenn zwei Kartographen das gleiche Datenmaterial unter Vorgabe der gleichen Regeln verwenden (vgl. [Spiess 1995]). Am Problem der Automation dieses Generalisierungsprozesses wird schon seit vielen Jahren geforscht, wenn auch mit unterschiedlicher Intensität [Meng 1997]. Dennoch entstanden noch keine durchgreifenden Lösungen, primär weil diese eine vollständige Formalisierung des Generalisierungsprozess erfordern. Es existiert mittlerweile eine Fülle von spezifischen Generalisierungsoperatoren – Problem ist jedoch deren Integration und Interaktion zu einem ganzheitlichen und konsistenten Ergebnis. Diese umfassende, ganzheitliche Aufgabe vermag bislang lediglich der menschliche Operateur zu lösen. Generalisierung ist ein kreativer Prozess, welcher Intelligenzleistungen erfordert [Müller, Weibel, Lagrange & Salge 1995]. Aus diesem Grund wird verschiedentlich vorgeschlagen, wissensbasierte Systeme einzusetzen, um den kartographischen Experten bzw. sein Können zu simulieren. Voraussetzung hierfür ist, sein Wissen in computerverarbeitbare Form zu übertragen. Dies erfordert insbesondere [McMaster 1991]:

- ▷ das Design, die Implementierung und das Austesten spezifischer Generalisierungsoperatoren,
- ▷ die Erstellung eines umfassenden formalen konzeptionellen Modells des Generalisierungsprozesses,
- ▷ sowie Akquisition des Expertenwissens und sein Kodieren in einer geeigneten Wissensrepräsentationsform [Reimer 1991].

Im Folgenden werden kartographische Generalisierungsoperatoren, sowie ihre mögliche algorithmische Umsetzung vorgestellt. Anschließend werden Methoden präsentiert, die nicht lediglich Einzeloperationen darstellen, sondern nach globaleren Lösungen suchen, welche durch eine Bündelung und vorgegebene Abfolge von Algorithmen erreicht wird. Die Möglichkeiten, Expertenwissen zu extrahieren werden dargelegt. Schließlich werden einige spezielle Ansätze zur Datenaggregation präsentiert.

4.3.1 Kartographische Generalisierungsoperatoren

Im Hinblick auf die Automation kartographischer Generalisierungsoperatoren wurde in [McMaster & Shea 1988, Shea & McMaster 1989] untersucht, *warum*, *wann* und *wie* generalisiert wird. Die Notwendigkeit der Generalisierung kann anhand bestimmter Maße (z.B. Dichte, Überschneidung, etc.) abgeleitet werden, die nutzbaren Methoden lassen sich unterschiedlich klassifizieren. Betrachtet man sie als Einzeloperatoren, so ergeben sich folgende Kategorien (vgl. [Hake & Grünreich 1994, Meng 1997]):

- ▷ *Vereinfachen durch Filterung oder Glättung*: Elimination kleiner Formen unter Beibehaltung der Objektcharakteristika.
- ▷ *Aggregation bzw. Zusammenfassen*: Benachbarte Objekte werden zusammengefasst. Hierbei sind verschiedene Nachbarschaften zu unterscheiden.
- ▷ *Kollaps*: Reduktion der Dimension von Objekten: linienförmige Objekte werden zu Punkten, Flächen zu Linien oder Punkten.
- ▷ *Selektion – Auswahl – Reduktion*: entsprechend der relativen Bedeutung der Objekte (wichtige Straße, orientierungsrelevantes Gebäude) bleiben Objekte erhalten.
- ▷ *Klassifizierung*: Objekte werden aufgrund gemeinsamer Attribute zusammengefasst.
- ▷ *Typifizieren*: eine Menge gleichartiger Objekte wird durch eine Teilmenge davon ersetzt, wichtig ist dass die Verteilung der ursprünglichen Objekte erhalten bleibt.
- ▷ *Verdrängung*: lokale Transformation von Objekten, um räumliche Konflikte zu beheben.
- ▷ *Vergrößern bzw. Betonen*: Die Objektcharakteristika werden besonders hervorgehoben, z.B. durch das Vergrößern eines Objektes, bzw. das Hervorheben der Kurvigkeit einer Straße.

Im Folgenden werden diese Operationen im einzelnen beschrieben, und Möglichkeiten ihrer Automation vorgestellt. Viele der geometrischen Operatoren basieren auf Techniken der *Computational Geometry* [Preparata & Shamos 1993],[de Berg, van Kreveld, Overmars & Schwarzkopf 2000].

4.3.1.1 Vereinfachen durch Filterung oder Glättung

Für die Vereinfachung stehen eine Fülle von Verfahren zur Verfügung, etwa die Linienglättung durch Auslassen von einzelnen Punkten bzw. durch approximierende Funktionen, aber auch durch morphologische Operatoren. All diese Operatoren bewirken eine Vereinfachung der Objektform, eine Reduktion der Komplexität und damit auch eine Reduktion des Datenvolumens. Bezüglich der ersten Kategorie ist der Algorithmus von Douglas & Peucker [1973] am stärksten verbreitet. Er wirkt global und benötigt lediglich einen Steuerparameter, welcher leicht aus den Daten bzw. aufgrund der gegebenen Aufgabenstellung ableitbar ist. Er lässt sich auf natürliche Objekte wie Küsten- oder Höhenlinien anwenden, ist jedoch weniger geeignet für anthropogene Objekte wie

Gebäude. Problematisch ist zudem die Tatsache, dass Objekte isoliert betrachtet werden – es kann also dazu kommen, dass sich benachbarte Objekte nach der Generalisierung schneiden. Dies gilt jedoch für alle Typen von Linienglättungsverfahren. Weitere Möglichkeiten der Glättung sind Filtermethoden (z.B. Gaussfilter), oder die Anwendung morphologischer Operatoren [Schweinfurth 1984].

Prinzipiell ist zu beachten, dass die Vereinfachung die Formcharakteristika der jeweiligen Objekte erhalten soll: ein Gebäude hat jedoch andere als ein Fluss und dieser wiederum andere als eine Straße. Daher existieren auch besondere Vereinfachungsmethoden für spezielle Objekte. Bei Straßen müssen Details erhalten bleiben bzw. betont werden, welche für die Navigation wichtig sind. Insbesondere sind dies die Kurvigkeit und die Anzahl und Art und Richtung der Kurven (z.B. bei Serpentinaen). Üblicherweise können im Zielmaßstab nicht alle Kurven dargestellt werden, so sind nur die Wesentlichen zu erhalten. Am Institut Geographique National (IGN) in Paris wurden eine Reihe von Algorithmen für verschiedene Linientypen realisiert ([Plazanet 1996], [Lecordix, Plazanet & Lagrange 1997], [Ruas 1999]). Eine interessante Möglichkeit, die Charakteristik einer Linie in Form ihrer markanten Strukturen zu bestimmen, ist die Nutzung einer Delaunay-Triangulation [van der Poorten & Jones 1999].

Das Problem der Liniengeneralisierung kann jedoch auch als Typisierungsaufgabe betrachtet werden, bei der es gilt, typische Strukturen einer Straße zu erhalten. Diese werden in Abschnitt 4.3.1.5 angesprochen.

Bei Gebäuden gilt es ebenfalls, die charakteristische Struktur zu erhalten, wenn nicht sogar zu betonen. Dies betrifft insbesondere die Rechtwinkligkeit. Mittels geeigneter Regeln kann spezifiziert werden, wie Gebäudekanten, die zu kurz sind, ersetzt werden [Staufenbiel 1973]. Ähnliche Konzepte wurden am IGN entwickelt, wo im Rahmen des AGENT-Projektes ([Lamy, Ruas, Demazeau, Jackson, Mackaness & Weibel 1999]) Gebäude als Einzelprozesse modelliert sind, die ihre verschiedenen Zwänge nacheinander lösen, indem sie die Rechtwinkligkeit erhalten wollen, Kleinformen eliminieren, sowie minimale Distanzen innerhalb des Objektes zu vermeiden suchen. Eine Generalisierung von 3D-Gebäuden kann mittels diskreter sogenannter Scale-Space-Events erreicht werden [Mayer 1998b]. Dieser Vorschlag ähnelt morphologischen Operationen im Vektorraum. Methoden der Gebäudegeneralisierung sind in spezifischen Programmen (CHANGE [Powitz 1992]), mittlerweile aber auch in GIS-Produkten, wie ArcInfo (ESRI) implementiert [Lee 1999]. In Kapitel 5.1 wird ein alternativer Vorschlag präsentiert, welcher sich dadurch auszeichnet, dass eine durch einfache Regeln erzeugte Näherungslösung mittels Ausgleichstechnik optimiert wird. Dadurch ist eine automatische Qualitätsbeurteilung des Ergebnisses möglich. Allen Ansätzen ist jedoch gemeinsam, dass sie die Gebäude als einzelne Objekte generalisieren, was in dichten Siedlungsgebieten zu Überlappungen führen kann. Hier müssen dann Ansätze verfolgt werden, die ein iteratives Vereinfachen und Aggregieren beinhalten [Meyer 1989].

4.3.1.2 Aggregation bzw. Zusammenfassen

Durch Zusammenfassen benachbarter Objekte wird die Anzahl der Objekte reduziert. Die Algorithmen unterscheiden sich danach, wie Nachbarschaft definiert wird. Sind die Objekte topologisch benachbart, so entsteht das aggregierte Objekt durch einfaches Weglassen der gemeinsamen Kante. Anders verhält es sich, wenn die Objekte einen gewissen Abstand haben. Durch morphologische Dilatation können Objekte vergrößert werden, wodurch ein Zusammenwachsen von Objekten erreicht wird. Anschließende Erosion stellt sicher, dass sich die globale Objektstruktur nicht geändert hat [Lay & Weber 1983], [Su, Li, Lodwick & Müller 1997]. Gleiches ist im Vektorbereich mittels Pufferoperationen zu erreichen. Handelt es sich jedoch um anthropogene Objekte, so müssen oft andere Operationen angewandt werden, etwa für das Verschmelzen von benachbarten Gebäuden. Hierzu können die Objekte entweder in Richtung aufeinander zu vergrößert werden, bzw. eines kann an das andere hin verschoben werden, oder die Lücke zwischen ihnen wird gefüllt [Bundy et al. 1995]. Die Nachbarschaft von Objekten kann auch durch eine Dreiecksvermaschung ermittelt werden, wobei diejenigen Objekte als benachbart gelten, welche ein gemeinsames Dreieck teilen. Auf diese Weise liegt ein Nachbarschaftsbegriff vor, welcher unabhängig von einem vorzugebenden Schwellwert (Pufferbreite) beschreibbar ist.

4.3.1.3 Kollaps

Die Reduktion der Dimension von Objekten bedeutet, dass flächenhafte Objekte zu Punkten oder Linien werden, bzw. Linien zu Punkten. Eine Stadt wird in einem Maßstab beispielsweise als Fläche dargestellt, im kleineren

allerdings auf einen Punkt reduziert. Eine Reduktion tritt auch auf, wenn flächenhafte Straßen (z.B. im Kataster) in eine linienhafte Struktur überführt werden (z.B. als Grundlage für ein Navigationssystem). Es können auch Mischformen auftreten, etwa wenn ein Fluss in einen See mündet: das flächenhafte Gesamtobjekt wird reduziert auf einen linienförmigen Fluss und einen flächenförmigen See (partieller Kollaps).

Typische Operation ist die Berechnung des Zentroids bzw. der Mittelachse (Skelett) eines Objektes. Das Skelett kann z.B. durch eine Voronoi-Berechnung ermittelt werden [Preparata & Shamos 1993]. Die Voronoi-Zelle eines Objektes ist das Gebiet, dessen Punkte alle näher am Objekt liegen, als an allen anderen Objekten. Bundy et al. [1995] schlagen eine vereinfachte Mittelachsentransformation vor, welche auf einer Triangulierung aller Objekte beruht. Für spezielle Objekte wie Gebäude ergeben sich jedoch besondere Skelette, wie sie beispielsweise durch eine Dachausmittlung gewonnen werden können [Fucke, Kirch & Nickel 1989], [Aichholzer & Aurenhammer 1995], [Brenner 2000]. Im Rasterbereich spricht man von einer Distanztransformation, welche sehr effizient berechnet werden kann [Su et al. 1997]. Hiermit lässt sich auch ein partieller Kollaps realisieren [Su, Li & Lodwick 1998].

4.3.1.4 Selektion – Auswahl – Reduktion

Durch Selektion wird nur ein gewisser Teil der Objekte übernommen. Selektionskriterien können qualitative oder quantitative Merkmale sein, aber auch graphische Mindestgrößen. Zum ersteren zählen thematische Merkmale, während im zweiten eher geometrische Eigenschaften bezeichnet werden. So können z.B. alle Objekte einer gewissen Thematik (Wohnhäuser, aber keine Garagen), bzw. Geometrie (Fläche größer 100 qm) in den neuen Datenbestand übernommen werden.

Oft ist auch gefordert, dass der Datenbestand um einen gewissen Prozentsatz an Objekten reduziert wird. Die Anzahl der darzustellenden Objekte kann mit dem Töpfer'schen Wurzelgesetz [Töpfer 1976] berechnet werden

$$n_f = n_a * \sqrt{M_a/M_f}$$

wobei n_a bzw. n_f die Anzahl der Objekte im Ausgangs- und Folgemaßstab $1 : M_a$ bzw. $1 : M_f$ bezeichnen². Eine weitere Möglichkeit ist das Erhalten des Schwarz-Weiss-Verhältnisses, d.h. des Verhältnisses von Vorder- und Hintergrund. Diese Maße geben aber nicht an, *welche* Objekte selektiert werden sollen. In der Regel gibt es eine Zielfunktion, die erhalten bleiben muss: etwa eine typische Punktverteilung, Flächenanordnung, oder Verhältnisse von groß und klein. Im Bereich der Generalisierung von Verkehrswegen oder -netzen ist es die Topologie, die erhalten bleiben muss. Dazu müssen die Objektgruppen zunächst analysiert werden, um die Eigenschaften zu ermitteln, die es zu erhalten gilt.

4.3.1.5 Typifizieren

Ist eine Reduktion der Anzahl der Objekte unumgänglich, so soll dies derart geschehen, dass die typische Struktur erhalten bleibt. Eine Häuserreihe, in der eine Baulücke steht, soll diese 'Unterbrechung' auch noch nach der Generalisierung aufweisen, genauso wie eine Serpentina-Straße ihre Kurvigkeit beibehalten soll. Dazu sind zunächst Objektgruppen zu erkennen, und darin Homogenitäten und Ausnahmen zu bestimmen. Gerade diese Ausnahmen in einer regelmäßigen Struktur bewirken einen hohen Wiedererkennungseffekt: etwa der Broadway in New York, welcher von dem sonst üblichen Straßenraster abweicht [Ruas & Mackaness 1997].

Typifizierung kann zum einen erreicht werden, indem eine bestimmte Anzahl repräsentativer Objekte ausgewählt wird. Hier ist die Art der Auswahl von besonderer Bedeutung, da diese Selektion die ursprüngliche Dichte der Objekte widerspiegeln muss – und beispielsweise nicht rein zufällig erfolgen darf. Eine weitere Möglichkeit ist die zufällige Auswahl von der zu erhaltenden Anzahl von Objekten. Diese müssen anschließend jedoch in ihrer Position so verschoben werden, dass sie die fehlenden Objekte ideal ersetzen. Weiterhin können anstelle der ursprünglichen Objekte auch symbolisierte Darstellungen gesetzt werden.

Zur Typisierung von punktförmigen Objekten wie Festpunkten, Brunnen, Bohrlöchern, etc. schlägt Töpfer [1976] vor, jeweils eine gewisse Anzahl von Objekten zu sog. 'Kleinkomplexen' zusammenzufassen, aus welchen

²Dieses Auswahlgesetz existiert in unterschiedlichen Formen, indem es etwa auch die Wurzel aus dem quadratischen oder kubischen Verhältnis der Maßstabszahlen beschreibt.

ein repräsentatives Objekt ausgewählt wird. Hierdurch ist somit eine Auswahl von 1:n zu erreichen. Liegt eine lineare Struktur vor, so kann jedes n-te Objekt ausgewählt werden, bei einer flächenhaften Verteilung hingegen muss zunächst eine Sortierung (z.B. durch streifenförmige Sortierung) durchgeführt werden, innerhalb derer dann die Kleinkomplexe ermittelt und reduziert werden können. Kritisch ist hier jedoch die Vorabsortierung, welche die spätere Selektion beeinflusst.

Die Anwendung von Binärbildanalyse für die Siedlungsgeneralisierung wird von Gottschalk [1973] untersucht: durch Majoritätsfilter können Einzelgebäude zu Gebäudegruppen zusammengefasst werden. Für die Typifizierung flächenhafter natürlicher Objekte schlagen Müller & Wang [1992] eine Kombination von Betonen und Verkleinern vor, welche das Ziel hat, große Strukturen zu erhalten, während kleine eliminiert werden – sofern sie nicht exponiert sind. Sie erreichen dies durch Anwendung von morphologischen Operatoren, welche Objekte entsprechend ihrer Größe unterschiedlich behandeln: große Objekte werden betont, während kleine verkleinert werden.

Im Rahmen der kartographischen Gestaltung von Felszeichnungen werden in [Hurni, Neumann & Hutzler 1999] zwei Verfahren vorgestellt, die prinzipiell auch für die Typifizierung eingesetzt werden können. Zur Darstellung von Geröll geht ein flächenhaftes Verfahren zunächst von einer regelmäßigen Verteilung von Punkten in einem Polygon aus; diese Punkte werden anschließend innerhalb gewisser Toleranzwerte zufällig verschoben, und mit einer entsprechenden Signatur versehen. Der linienhafte Ansatz verfährt ähnlich, indem Geröllsignaturen längs einer Linie zufällig aufgereiht werden.

Regnauld [1996] widmet sich der Typifizierung von Häuserreihen. Ausgangspunkt und Voraussetzung dieses Ansatzes ist, dass die Gebäude linear angeordnet sind – eine Eigenschaft, die durch die typische Anlage von Gebäuden längs von Straßen begründet ist. Er ermittelt zunächst die Struktur der Szene, um anschließend gezielt vereinfachen zu können. Die Struktur drückt sich in diesem Fall in der Nachbarschaft aus. Gruppen von Gebäuden mit ähnlichen Nachbarschaftswerten (Abstände) werden über einen Graph-Theoretischen Ansatz (minimaler Spannbaum) ermittelt. Innerhalb der Gruppen werden bedeutende (bezüglich Typ oder Form) Objekte erhalten, die anderen entsprechend dem verfügbaren Raum platziert. Nachteil dieses Verfahrens ist die Tatsache, dass es nur im Eindimensionalen konzipiert ist – nur lineare Strukturen von Häuserreihen werden typifiziert. Andererseits ist das auch eine herausragende phänomenologische Eigenschaft von Gebäuden, dass sie längs Straßen aufgereiht sind, um erreichbar zu sein [Hangouet & Lamy 1999].

Das Typifizieren von linienhaften Strukturen erfordert andere Ansätze. Objekte sind hier Flüsse, Straßen, etc., zumeist Verkehrswege. Hier gilt es zweierlei zu unterscheiden: zunächst können die Linien als Einzelphänomene betrachtet werden, deren typische Struktur es zu erhalten gilt; desweiteren bilden allerdings mehrere Linien zusammen eine größere Einheit, ein Verkehrsnetz, dessen funktionelle Eigenschaften beizubehalten sind. Ersteres wurde bereits oben im Zusammenhang mit der Vereinfachung angesprochen (vgl. Abschnitt 4.3.1.1).

Eine Linie muss jedoch auch in ihrem Zusammenhang betrachtet werden – linienhafte Objekte können nicht lediglich aufgrund ihrer Geometrie oder ihres Typs weggelassen oder generalisiert werden, da sie üblicherweise eine Funktion haben, die erhalten bleiben muss. Ansätze, die ein gesamtes Liniennetz (typischerweise Gewässer- oder Verkehrsnetz) behandeln, berücksichtigen daher die funktionale Bedeutung der Objekte. Die wesentliche Funktion eines Straßennetzes ist die Tatsache, dass es verschiedene Orte miteinander verbindet. Somit können Straßenobjekte nur dann weggelassen werden, wenn sie für das Netz bzw. für die Verbindung keine Bedeutung haben. Einige Ansätze verwenden daher Kürzeste-Wege-Analysen (z.B. Dijkstra oder ähnliche [Aho, Hopcroft & Ullman 1983]), um die Verbindungen innerhalb eines Netzes zu beschreiben und zu erhalten. Zusätzlich kann eingebracht werden, ob die Wege wichtige Objekte verbinden sollen, etwa touristische Orte ([Richardson & Thomson 1996]). Diejenigen Kanten im Graph können wegfallen, deren Knoten auf eine andere Art auch noch erreicht werden können.

Morisset & Ruas [1997] schlagen vor, über Simulation des Fahrverhaltens typischer Autofahrer zu ermitteln, welche Straßen befahren werden und daher bedeutend sind oder nicht. Auf diese Weise können wenig, oder gar nicht benutzte Straßen aus dem Netz genommen werden – vorausgesetzt, die Topologie wird dadurch nicht verletzt. Eine Analyse der Baublöcke, die durch Straßenzüge eingeschlossen sind, ist Basis eines Ansatzes von Peng [1997]: Gebiete, die zu klein sind, werden mit benachbarten verschmolzen, dabei entfällt die dazwischenliegende Verbindung (Straße). Dieses Verschmelzen erfolgt nach bestimmten Kriterien, etwa dürfen keine durchgehenden Straßenstücke zergliedert werden. Ein ähnlicher Ansatz wird auch in Ruas [1999] beschrieben: Straßen zwischen

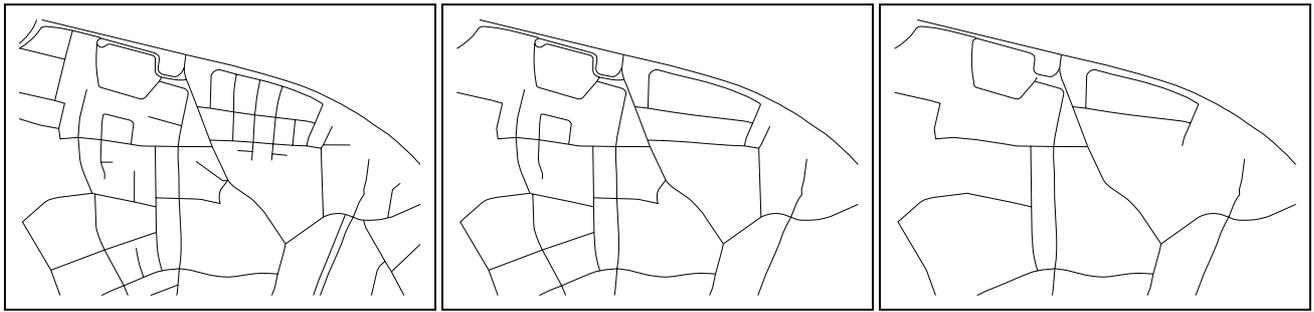


Abbildung 4.4: *Generalisierung eines Straßennetzes nach dem Prinzip der guten Fortsetzung. Ausgangssituation (links), Ergebnis der Generalisierung mit einem Reduktionsfaktor von 50% (Mitte) bzw. 70% (rechts).*

Wohngebieten können entfallen, wenn es sich um gleichartige Gebiete handelt und die Form des aggregierten Objektes nicht komplexer wird.

Ein neuerer Ansatz von Richardson & Thomson [1999] beruht auf dem Gestalt-Prinzip der 'guten Fortsetzung'. Die attraktive Idee dabei ist, dass geradlinig verlaufende Straßen auch eine höhere Bedeutung haben als solche, die sich stark verzweigen. Zunächst erfolgt eine Gruppierung der Straßen nach diesem Prinzip. Zusätzlich kann auch noch die Bedeutung einer Straße (bzw. Linie) mit kodiert und somit berücksichtigt werden. Die Umsetzung führt zu sehr ansprechenden Generalisierungen (vgl. Abbildung 4.4). Es wird deutlich, dass kleinere Straßen wegfallen und die großen Straßenzüge erhalten bleiben. Liegen mehrere dieser langen Straßen nebeneinander, kann es allerdings zu unerwünschten Objektdichten führen (vgl. Straßen im oberen Bereich der Abbildung). D.h. das Verfahren betrachtet nicht die räumliche Nähe der Objekte.

4.3.1.6 Klassifizierung

Die Änderung der Repräsentation bezüglich der Thematik erfolgt in Abhängigkeit von der neuen Objektbeschreibung. Beim Übergang von einer Repräsentation in die andere können gesamte Objektklassen wegfallen, Objekte entsprechend ihrer Attribute dargestellt werden, bzw. Objekte neu klassifiziert werden. Z.B. können Feldwege und Wanderwege zur Klasse Weg zusammengefasst werden. Ferner können neue Objektklassen entstehen. Auch können Attribute wegfallen, oder sie können sich ändern bzw. zusammengefasst werden. Klassifikationen können aber auch automatisch durchgeführt werden, indem Objekte aufgrund ihrer Attribute neue Objektklassen bilden.

4.3.1.7 Verdrängung

Mittels Verdrängung werden räumliche Konflikte (zu geringe Distanz bzw. Überlappung) aufgelöst. Primär entstehen diese, weil Objekte um ihre Lesbarkeit zu erhalten bzw. Bedeutung zu unterstreichen, vergrößert werden müssen oder andere Objekte nach Anwendung von Generalisierungsoperatoren überlagern. Verdrängung erfordert, dass räumliche Beziehungen und Objektformen gleichermaßen erhalten bleiben müssen. Weiterhin sollen die Verschiebungen möglichst keine Folgekonflikte erzeugen. Typischerweise geht man davon aus, dass die Verdrängung lediglich geometrische Konflikte lösen muss und genügend Raum für die Verschiebung der Objekte vorhanden ist – dies setzt voraus, dass andere Generalisierungsoperatoren bereits vorab durchgeführt worden sind (etwa Vereinfachung, Selektion oder Aggregation).

Verdrängung kann zwischen allen Arten geometrischer Objekte (Punkte, Linien, Flächen) vorkommen. Ziel ist die Auflösung der Verdrängung durch minimale Verschiebung von Objekten, bei gleichzeitiger Beibehaltung der räumlichen und objektspezifischen Situation. Der grundsätzliche Fall des seitlichen Verdrängens von Objekten bezüglich festzuhaltender Linien wurde von Gottschalk [1972] und [Lichtner 1976] beschrieben. Über sog. Verdrängungszonen wird die Verdrängung benachbarter Objekte definiert, wobei diese mit wachsender Entfernung abnimmt. Weitere Vorschläge konzentrieren sich ebenfalls auf die Prüfung individueller Konfliktfälle durch zum Teil aufwendige Untersuchungen der lokalen Geometrie [Schittenhelm 1978]. Ein Ansatz von Nickerson [1988] arbeitet auf linienhaften Objekten. Aus den Überlagerungen, die sich durch Einführung einer Symbolik ergeben, können Verschiebungsvektoren ermittelt werden. Wengleich ansprechende Resultate erzielt wurden, insbesondere bei Einmündungen von Straßen, werden Folgekonflikte nicht berücksichtigt.

Die Nutzung von sog. Verdrängungsgebirgen wurde von [Jäger 1990] vorgeschlagen. In einem Raster wird für jedes Objekt ein Gebirge errichtet, wobei die Höhe sich nach seiner Bedeutung richtet. Aus diesem Gebirge können anschließend Richtung und Ausmaß der Verdrängung ermittelt werden. Mackaness [1994] setzt eine radiale Verdrängung aller Objekte ausgehend von einem gegebenen Punkt an. Der Grad der Verschiebung richtet sich dabei nach dem Abstand vom Verdrängungszentrum. Auch hier können Folgekonflikte entstehen. Ebenfalls eine lokale, sequentielle Strategie zur Verdrängung von Gebäudeobjekten wird von Ruas [1998] präsentiert: Objekte versuchen lokal den jeweiligen Freiraum zu nutzen, wobei zunächst die Objekte, die den größten Konflikt verursachen, verdrängt werden. Problem bei dieser lokalen Methoden ist die Tatsache, dass durch eine Verschiebung *eines* Objektes neue Konflikte entstehen können, was im ungünstigsten Fall sogar zu unendlichen hin- und herschieben führen kann.

Im Gegensatz zu diesen lokalen Verfahren nutzt Hojholt [1998] eine globale Methode in Form eines Finite-Elemente-Ansatzes. Dort werden die Eigenschaften von Objekten und ihre räumlichen Beziehungen mittels (elastischer und steifer) Materialien modelliert, wobei von einer Nachbarschaftsbeziehung durch vermaschte Dreiecke (Delaunay-Triangulation) ausgegangen wird. Das Verfahren arbeitet global, indem es alle Objekte gleichzeitig behandelt. Nachteil ist, dass Eigenschaften der Objekte in sich nicht modelliert werden können, beispielsweise die Geradlinigkeit einer Straße, oder die Rechtwinkligkeit eines Gebäudes.

Ebenfalls die Idee eines Kräftespiels zwischen verschiedenen Objekten liegt dem Ansatz von Burghardt & Meier [1997a] zugrunde, mit welchem linienhafte Objekte mittels Snakes verdrängt werden. Auch Bobrich [1996] nutzt ein mechanisches Analogon, nämlich Federkräfte, zur Modellierung der Verdrängung. Verdrängung kann auch als Optimierungsprozess betrachtet werden: Ware & Jones [1998] beschreiben die Verdrängung als Suchproblem, bei dem verschiedene neue Positionen der Objekte sukzessive getestet werden, um schließlich ein Optimum zu finden. Hierzu setzen sie Simulated Annealing als Methode an. Nachteil dieses Ansatzes ist, dass lediglich Verschiebungen, aber keine Verdrehungen der Objekte möglich sind. In Endrullis [1988] findet sich der Vorschlag, die Verdrängung als Optimierungsproblem anzusehen, wo es gilt, einen Kompromiss innerhalb gegebener Restriktionen zu finden: den Erhalt der Geometrie und der Relationsinformationen bei Beibehaltung der Lesbarkeit. Er führt dabei an, dass gegeneinander zu wichtende Zielgrößen abzustimmen sind, wie beispielsweise die Abstände, die minimalen Verschiebungsbeträge, die Wahrung der geometrischen und topologischen Beziehungen, sowie die Verdrängungspriorität. Die Idee, diese Optimierung mittels Kleinste-Quadrate-Ausgleichung umzusetzen, wurde von Burghardt & Meier [1997b], Harrie [1999], Sarjakoski & Kilpelainen [1999] und Sester [1999b] ausgearbeitet. Die Ansätze unterscheiden sich primär in der Repräsentation der Situation und der Ableitung der wirkenden Einschränkungen und Zwänge, sowie in der Möglichkeit, objektspezifische Eigenschaften einzubringen. Der eigene Ansatz wird in Kapitel 5.2 ausführlich präsentiert.

4.3.1.8 Betonen, Vergrößern

Objekte, die eine bestimmte Bedeutung haben, müssen erhalten bleiben, obwohl sie aufgrund ihrer Größe eliminiert werden müssten. Dies sind zum einen (semantisch) bedeutende Objekte, aber auch Objekte, die für die Orientierung wichtig sind, etwa eine Scheune im freien Feld. Dies bedeutet, dass die Größenverhältnisse dieser Objekte nicht maßstabsgetreu wiedergegeben werden, um sie gegenüber ihrer Umgebung hervorzuheben. Vergrößern kann durch einfaches Skalieren erfolgen. Gegebenenfalls ist das Objekt aber auch durch einen Platzhalter bzw. ein Symbol zu ersetzen.

4.3.2 Konzepte für ganzheitliche Lösungen

Die bisher beschriebenen Ansätze konzentrieren sich auf Einzelprobleme und deren Lösungen. Die Objekte wurden dabei isoliert betrachtet. Das Problem ist jedoch, dass die separate und sequentielle Anwendung von einzelnen Operatoren nicht immer zu einem günstigen Ergebnis führt, da die Operatoren z.T. interagieren, bestimmte, individuelle Voraussetzungen haben, oder nur in bestimmten Situationen angewandt werden können. Um den Gesamtkontext einer räumlichen Situation zu erhalten, sollten die Objekte nicht einzeln, sondern im Zusammenhang generalisiert werden. Für die Automation muss dieser Kontext daher explizit gemacht werden. Hierzu ist es insbesondere zu klären, welcher der verschiedenen alternativen Operatoren für eine konkrete Aufgabe ausgewählt wird (z.B. existiert eine Fülle von Algorithmen zur Generalisierung von Linien), wie seine

Parameter entsprechend dem Aufgabenziel einzustellen sind, sowie wie die Abfolge verschiedener Operatoren vorzugeben ist.

Mit dem Ziel, Generalisierung integriert zu behandeln, entstanden Konzepte, die insbesondere auf die Einbeziehung des Generalisierungsziels und des jeweiligen Kontexts abzielen [McMaster 1991]. Im Vorschlag von Brassel & Weibel [1988] wird propagiert, die Generalisierung in folgende Komponenten zu unterteilen: Strukturerkennung, Prozesserkennung, Prozessmodellierung, Prozessausführung und Präsentation. Die genaue Kenntnis des Objektes bezüglich seiner inneren und äußeren Struktur (Eigenschaften und Relationen zu anderen Objekten) ist hierbei die wesentliche Voraussetzung. Im Schritt der Prozesserkennung werden zugehörige Generalisierungsoperatoren und ihre Parameter identifiziert, welche anschließend zusammengestellt werden. Die Ausführung dieser Operatoren führt schließlich zu einer abstrakteren Darstellung, welche entsprechend symbolisiert dann die gewünschte Karte darstellt. Ein vergleichbarer Ansatz wird von Shea & McMaster [1989] präsentiert. Er beschreibt in ähnlicher Weise *warum*, *wann* und *wie* generalisiert werden soll. Hinter der Frage nach dem *wann* verbirgt sich die Idee der Struktur-Erkennens und Prozessmodellierens, während unter *wie* eine Reihe von Generalisierungsmethoden angeführt werden. Mackaness [1995] beschreibt, dass typischerweise ein strikt vorgegebener Plan der Generalisierung nicht verwirklicht werden kann. Vielmehr ist es ein adaptiver Prozess, bei dem lokale Operatoren wiederholt angewandt werden müssen, um schließlich ein Ergebnis zu erhalten. Seine Ideen beziehen sich primär auf eine interaktive Umgebung, wo der Nutzer eines Geo-Informationssystems bei der kartographischen Gestaltung unterstützt werden sollen. Sie lassen sich prinzipiell aber auch auf automatische Prozesse übertragen. Eine Mischung dieser Ansätze vertreten Ruas & Plazanet [1996], indem sie einen globalen, deterministischen Plan vorgeben, welcher jedoch aus Teilzielen besteht, die adaptiv, jeweils abhängig von lokal wirkenden Beschränkungen und Zwängen, gelöst werden. Sie werden damit der Tatsache gerecht, dass ein globales Ziel nicht einheitlich formuliert werden kann, sondern die (mitunter iterative) Anwendung lokaler Operatoren erfordert. Eine globale Strategie wird – gesteuert durch äußere Zwänge – lokal verfeinert.

Diese Ideen werden im Rahmen eines EU-Projektes AGENT [Lamy et al. 1999] realisiert. Die Grundidee ist, dass kartographische Objekte als Agenten betrachtet werden, die über eine gewisse Autonomie verfügen. Sie sehen sich Zwängen ausgesetzt, die sie mittels Operationen lösen können. Aus der Fülle möglicher Operationen kann über Parameter und Gewichte (Schwellwerte) die jeweils optimale Methode ermittelt und ausgeführt werden. Ziel ist es, möglichst alle Zwänge aufzulösen. Das Konzept ist als Multi-Agentensystem realisiert, wo globale, gemeinsame Ziele mittels sog. Meso-Agenten verfolgt werden, die individuellen, lokalen Ziele dagegen mittels Micro-Agenten. Verwirklicht wird dieses Konzept derzeit für das Beispiel der Gebäudegeneralisierung und der Vereinfachung von Straßen. In diesem Zusammenhang wurden Strategien erarbeitet, welche die verschiedenen Algorithmen zur Liniengeneralisierung integrieren. Zunächst wird eine Linie entsprechend ihrer Form in homogene Teilstücke untergliedert; diese werden anschließend entsprechend dem Linientyp mit dedizierten Algorithmen bearbeitet (Glättung, Karikatur, ...) [Plazanet, Bigolin & Ruas 1998]. Unterteilt werden Linien insbesondere dort, wo sich durch die Signatur Überlagerungen ergeben. Mustiere [1998] unterscheidet dabei Teilstücke, die lediglich geglättet werden müssen, solche, die eine einfache Kurve aufweisen, und solche mit komplexer Kurve. Einfache Kurven werden aufgeweitet, komplexe können ebenfalls aufgeweitet werden, indem sie – gleich einem Akkordeon – auseinandergezogen werden, dies ist jedoch nur möglich, wenn hierfür genügend Platz vorhanden ist. Ist das nicht der Fall, so muss eine Schematisierung erfolgen, indem ein Bogen herausgenommen wird. Das Verfahren zeichnet sich insbesondere durch diese Struktur-abhängigen Operationen aus. Hierdurch erreicht es eine große Flexibilität und Akzeptanz. Das Ergebnis entsteht durch eine Integration von Einzelprozessen, welche jeweils optimal adaptiert sind an die geometrische Situation.

Die Bedeutung der Integration des Kontexts wird auch in Mackaness, Weibel & Buttenfield [1997] speziell hervorgehoben. Sie kann unterschiedlich angegangen werden: Kontext bezieht sich zum einen auf die beteiligten Objekte und ihre zugehörigen Maßstäbe: in größeren Maßstabsbereichen dominiert die Geometrie, d.h. die Vereinfachung geometrischer Formen. In kleineren Maßstabsbereichen kommt zunehmend die Semantik hinzu [Müller & Wang 1992]. Damit wird die Darstellung kartographischer Objekte mit kleiner werdendem Maßstab zunehmend abstrakter [Glover & Mackaness 1999]. Wenn beispielsweise in größerem Maßstab ein Gebäude noch in seiner exakten Form wiedergegeben wird, so erscheint es in kleinerem Skalen meist als Rechteck oder Quadrat bzw. als Symbol. Die Generalisierung in größeren Maßstäben betrifft daher primär die Geometrie, d.h. die Operatoren Vereinfachung, Vergrößerung und Verdrängung werden genutzt. Ab einem bestimmten Maßstab allerdings ist das Objekt in seiner ursprünglichen Form nicht mehr darstellbar, es muss symbolisiert werden. Dieser Maßstab ist jedoch nicht für alle Objekte gleich und somit objektabhängig. Ein solches Beispiel ist der

Wechsel der räumlichen Dimension eines Objekts: die Analyse von Karten unterschiedlicher Maßstäbe zeigte, dass beispielsweise Industrieanlagen ihre Repräsentation zwischen 1:62.500 und 1:100.000 ändern, während Flüsse sie zwischen 1:100.000 und 1:250.000 ändern [Buttenfield 1995].

Kontext kann aber auch als räumlicher Kontext verstanden werden, und damit über die Nachbarschaft der Objekte definiert werden. Bundy et al. [1995] schlagen einen ganzheitlichen Ansatz vor, welcher auf der sog. SDS (Simplicial Data Structure) basiert. Diese Simplex-Struktur besteht im 2D-Fall aus Dreiecken, daher vernetzt diese Struktur alle Objekte einer Szene durch eine Dreiecksvermaschung und legt somit die jeweiligen Objektnachbarschaften fest. Basierend auf dieser Datenstruktur formulieren die Autoren eine Reihe von Operationen wie Betonen, Aggregation, oder auch die Identifikation von Konflikten als Vorinformation für die Verdrängung. Wichtig ist jedoch, Strukturen dieser Art auszunutzen, um zu generalisierende Situationen zu identifizieren, und auch die hierfür nötigen Operationen. Ruas & Mackaness [1997] schlagen hierfür die Nutzung eines Dichtemaßes vor, was anhand der Generalisierung von städtischen Gebieten exemplarisch aufgezeigt wird. Das Dichtemaß errechnet sich aus dem Flächenbedarf der generalisierten (symbolisierten) Objekte im Verhältnis zur gegebenen Fläche. Ist es beispielsweise größer als 100 %, so müssen die Gebäude zu einem Block zusammengefasst werden. Ist es kleiner als 60%, so können die Objekte beibehalten werden, liegt es dazwischen, so muss eine Objektreduktion erfolgen. Anschließend können Formvereinfachung und Verdrängung ablaufen.

Solche Regeln für die automatische Auswahl der nötigen Operatoren ist eine Schlüsselaufgabe der automatischen Generalisierung. Prinzipiell ist hierfür das Erkennen von Strukturen wichtig, das ein Interpretationsproblem darstellt. Vergleichbar den Ansätzen in der Bildverarbeitung, werden hierzu Modelle benötigt, die eine Situation abstrakt beschreiben. Verfahren zur Strukturerkennung von räumlichen (Vektor-) Datenbeständen werden im Bereich des sog. Spatial Data Mining untersucht [Fayyad, Piatetsky-Shapiro, Smyth & Uthurusamy 1996, ISL 1996, Koperski & Han 1995, Anders & Sester 2000]. Hier geht es primär darum, in großen Datenbeständen implizite Information zu finden. Data Mining Verfahren nutzen prinzipiell KI-Verfahren wie Maschinelles Lernen. Lernverfahren können im Rahmen eines interaktiven Systems eingesetzt werden, indem ein Lehrer Beschreibungen identifiziert, deren interne Struktur direkt aus den verfügbaren Daten abgeleitet wird. Hiermit wird zweierlei erreicht: Zum einen erhält man eine Beschreibung der Objekte, die der Nutzer in den Daten wiederfinden will. Zum anderen werden diese Objekte in der Beschreibungssprache des Systems – als Funktion der gegebenen, beobachtbaren Merkmale – ermittelt und können somit direkt verwendet werden [Sester 1995]. Für die Nutzung der Modelle müssen diese explizit formuliert und entweder als generische oder spezifische Modelle vorliegen.

Dieses Wissen muss einem automatischen System zur Verfügung stehen, damit es korrekte Entscheidungen treffen kann. Darüberhinaus werden Maße benötigt, das Ergebnis der Operationen zu bewerten und ihre Qualität für den Gesamtprozess zu evaluieren. Die Automation solcher menschlicher Intelligenzleistungen kann in wissensbasierte Systeme abgebildet werden. Kritischer Punkt solcher Systeme ist das Erfassen und Formalisieren des zugrundeliegenden Wissens.

In jüngster Zeit wurden daher verschiedentlich Methoden für den Wissenserwerb für ein 'kartographisches Expertensystem' vorgeschlagen. Bei der Formalisierung und Automatisierung der Wissensakquisition handelt es sich um ein Problem der Künstlichen Intelligenz [Rich 1988, Winston 1977, Nilsson 1982].

4.3.3 Wissenserwerb für die Generalisierung

Zum Erwerb des Wissens eines Kartographen und dessen Kodierung in einem wissensbasierten System können verschiedene Methoden und Verfahren eingesetzt werden [Weibel 1995]. Zunächst kann es durch Expertenbefragungen bzw. durch Studium von Büchern (z.B. [Imhof 1965]) oder existierenden Regeln ermittelt werden. Das übliche Problem des Wissenserwerbs ist hierbei, dass ein Großteil des genutzten Wissens gar nicht explizit vorhanden ist, sondern vom Operateur implizit genutzt wird. Hierzu zählt insbesondere die äußere Situation, der Kontext der Objekte, die der menschliche Operateur üblicherweise 'auf einen Blick' erfasst. Weiterhin sind Handbücher oder Beschreibungen oft für den Menschen entworfen und lassen sich daher nicht direkt in ein regelbasiertes System einführen.

Eine weitere Wissensquelle sind existierende Datenbestände, aus denen mittels 'reverse engineering' auf die zugrundeliegenden Aussagen geschlossen werden kann. Dies kann durch Analyse existierender Kartenwerke geschehen [Mark 1991].

Weiterhin können Verfahren des Maschinellen Lernens eingesetzt werden. Ziel dieser Methoden ist das Ableiten von explizitem Wissen aus implizit Gegebenem [Michalski, Carbonell & Mitchell 1984]. Solche Verfahren lassen sich nutzen, wenn aus bekannten Situationen und Aktionen Rückschlüsse auf die zu treffende Aktion in einer neuen Situation getroffen werden kann ([Weibel, Keller & Reichenbacher 1995]). Auch lassen sie sich erfolgreich einsetzen, um die Abfolge verschiedener Generalisierungsverfahren optimal bezüglich gegebener Situationen zu trainieren [Plazanet et al. 1998], [Regnault & Mustiere 2000]. Ferner können sie genutzt werden, um natürlichsprachliche Begriffe, die der Mensch üblicherweise intuitiv einsetzt (nah, benachbart, . . .), in Maßzahlen zu überführen [Sester 1999a] (vgl. auch Seite 44). Eine weitere Art von Lernverfahren sind Neuronale Netze [Dorffner 1991]. Vorteil von Techniken des Maschinellen Lernens gegenüber Neuronalen Netzen ist die Tatsache, dass die abgeleiteten Regeln interpretierbar sind, und daher nachvollzogen werden kann, ob die Regel Sinn macht. Das Ergebnis Neuronaler Netze ist im Netz selbst kodiert, etwa in den Gewichten eines Backpropagation-Netzes [Rumelhard & McClelland 1986], und lässt sich daher nicht prüfen. Dies ist besonders wichtig, da ein Beweis der Richtigkeit der gefundenen Lösung nicht möglich ist – sie kann nur durch Gegenbeispiele falsifiziert werden.

4.3.4 Spezielle Ansätze zur integrierten Modellgeneralisierung

Wenn die kartographische Generalisierung primär durch den Maßstab als steuernde Größe bestimmt wird (bei gegebener Thematik), so geht es in der Modellgeneralisierung darum, diese reduzierte Thematik zu erstellen. Dies erfordert, dass bestimmte Objekte, Situationen, Gegebenheiten in einer speziellen Repräsentation hervorgehoben werden. Somit werden typische, charakteristische Eigenschaften der darzustellenden Thematik in einen neuen Datensatz überführt. Als Beispiel sei eine Touristische Karte genannt, in der alle Objekte, die von Interesse sind, eingetragen sein müssen. Daneben müssen – um ihre Erreichbarkeit zu gewährleisten – auch die entsprechenden Verkehrswege und bedeutenden Ausgangspunkte (z.B. wichtige Städte in der Nähe), sowie orientierungsrelevante Details repräsentiert werden.

Im Folgenden werden einige Ansätze präsentiert, die sich mit dieser Datenabstraktion beschäftigen. Die wichtigsten Operatoren für diese semantisch-geometrische Generalisierung sind Selektion, Klassifikation und Aggregation.

Die Aggregation von einzelnen Objekten zu neuen Objekten erfordert Angaben über die Nachbarschaft von Objekten. Solche Nachbarschaftsbeziehungen sind kontextabhängig zu definieren und im Datensatz aufzudecken. Selbst wenn dies bekannt ist, sind noch weitere Gegebenheiten zu beachten. Die Aggregation adjazenter Objekte muss beispielsweise berücksichtigen, welche Objekte zunächst zuerst zusammenzufassen sind, bzw. wann adjazente Objekte nicht aggregiert werden dürfen. Ersteres betrifft den Fall, dass ein Objekt mehrere in Frage kommende Nachbarn hat, letzteres den Fall, dass die gemeinsame Kante zweier Objekte ein drittes Objekt darstellt, etwa eine linienförmige Straße. Gleiche Überlegungen gelten für andere Nachbarschaftstypen.

Im Folgenden werden einige Ansätze vorgestellt, welche diese Aggregation von Objekten durchführen. Alle diese Ansätze arbeiten bottom-up, indem sukzessive benachbarte Objekte zusammengefasst werden.

4.3.4.1 Aggregation auf der Basis von vorgegebenem Kompatibilitätsmaß

Die meisten Ansätze gehen von einer Parkettierung des Raumes aus, bei der alle Objekte als flächenhaft dargestellt werden. Objekte, die für die Zielerstellung zu klein sind, werden mit anderen Objekten verschmolzen. Die Art der Verschmelzung kann rein geometrisch (flächenorientiert) ablaufen, wobei kleine Objekte mit benachbarten verschmolzen werden. Die Einbeziehung von Thematik ist möglich, indem das zu kleine Objekt nur mit vergleichbaren Nachbarobjekten verschmolzen werden kann. Kompatible Objekte gehören zu ähnlichen Objektklassen, indem sie etwa aus einer Objekthierarchie stammen (z.B. aus Objektartenkatalogen ableitbar). Ein Beispiel ist das Zusammenfassen von Laub-, Nadel- und Mischwald zu einer Klasse Wald. Diese Generalisierung kann anwendungsabhängig gesteuert werden, indem Objektklassen mit speziellen Gewichts- (d.h. Bedeutungs-) faktoren versehen werden, welche angeben, ob ein Objekt im Generalisierungsprozess erhalten bleiben soll oder nicht (z.B. kann für eine konkrete Anwendung angegeben werden, dass Nadelwald als Objektklasse erhalten bleiben soll, während alle anderen Waldtypen zusammengefasst werden). In dieses Kompatibilitätsmaß kann

auch noch die Fläche eingehen, und somit können kleine Flächen eher aggregiert werden als andere [Bregt & Bulens 1996].

Ein ähnlicher Ansatz wird mit Hilfe des GAP-Baums (Generalized Area Partitioning) [van Oosterom 1995] realisiert. Sein Kompatibilitätsmaß berücksichtigt neben dem Objekttyp und der Größe des Nachbarn zusätzlich noch die Länge der gemeinsamen Kante als Kriterium, welchem Nachbarobjekt ein zu eliminierendes Objekt zugeschlagen werden soll. Das Verfahren zielt auf eine schnelle Visualisierung von Objekten ab. Ausgehend von einer Parkettierung des Raumes durch ausschließlich flächenhafte Objekte, wird eine sukzessive Aggregation der Objekte durchgeführt. Objekte, die für die momentane Visualisierung zu klein sind, werden auf der Basis des Kompatibilitätsmaßes aggregiert. Das Verfahren arbeitet bottom-up und lokal. Die Aggregation wird in einer Baumstruktur mitgeführt. Diese erlaubt es später, effizient auf die Objekte zuzugreifen, und zwar jeweils nur bis zu der Auflösungsebene, die für die momentane Aufgabe nötig ist.

Das Problem hierbei ist, dass eine einzige Generalisierungsregel nicht alle Möglichkeiten beschreiben kann. Unter Umständen kommen Zwänge durch globalere Eigenschaften ins Spiel, die lokal nicht entschieden werden können. Hierzu muss mehr Semantik in den Prozess eingebracht werden, indem objekt- und situationsspezifische Regeln formuliert werden.

4.3.4.2 Aggregation basierend auf semantischem Modell

Der Übergang von Maßstabsbereich 1:25.000 nach 1:250.000 ist Gegenstand der Untersuchungen von [Schürer 1998]. Eine Analyse der Objektartenkataloge legt dar, welche Objekte im Folgemaßstab noch vorhanden sind, sowie nach welchen Erfassungsvorschriften sie abzulegen sind. Generalisierung wird als Funktion der Objektgeometrie, Objektattribute sowie des Kontexts angegeben. Oft sind die relevanten Geometrieattribute nicht direkt gespeichert und müssen zunächst aus dem Datenbestand abgeleitet werden. Kritischer ist allerdings, dass der Kontext oft auch nicht direkt gespeichert ist, sondern über gemeinsame geometrische Primitive ermittelt werden muss. Ein solches Beispiel ist eine Stromleitung, die nur zusammen mit den zugehörigen Pfeilern generalisiert werden kann. Der Zusammenhang ist allerdings in den Datenbeständen nicht explizit modelliert.

Der Ansatz von Anders & Sester [1997] beschreibt ein Verfahren zur Aggregation von Siedlungsobjekten (ATKIS 1:25.000) aus Katasterdaten. Basierend auf dem Objektartenkatalog (OAK) wird zunächst der Zusammenhang zwischen den Objekten der jeweiligen Maßstabsbereiche in Form einer semantischen Beschreibung herausgearbeitet und modelliert. Diese semantische Beschreibung wurde anschließend in einem Regelwerk kodiert. In der ALK sind u.a. die Flurstücke, sowie die Gebäude mit ihren jeweiligen Nutzungen beschrieben. Der ATKIS-OAK [Amtlich Topographisches-Kartographisches Informationssystem (ATKIS) 1988] beschreibt die Erfassungsvorschrift für Wohnbauflächen (2111) folgendermaßen:

Eine baulich geprägte Fläche, die ausschließlich oder vorwiegend dem Wohnen dient. Neben den Wohngebäuden sind z.B. anzutreffen: der Versorgung der Fläche dienende Läden, nicht-störende Handwerksbetriebe, Einrichtungen für kirchliche, kulturelle, soziale und gesundheitliche Zwecke.

Die Grenze zwischen einer Wohnbaufläche und benachbarten Flächen wird in der Regel durch die Grenzen der bebauten Grundstücke unter Einbeziehung der Hofraumflächen und der Hausgärten gebildet.

Dies führt zu der Regel, dass angrenzende Flurstücke dann aggregiert werden dürfen, wenn sie Gebäude kompatiblen Typs enthalten. Auf diese Weise muss die Information, die in den Datenmodellen gegeben ist, sorgfältig analysiert werden und in eine rechnerverarbeitbare Form überführt werden. Dies wurde in einem Modellierungsschritt erreicht, der sämtliche implizite Information explizit machte. Abbildung 4.5 zeigt das konzeptionelle Modell des Regelwerks in Form eines semantischen Modells in OMT-Notation [Rumbaugh, Blaha, Premerlani, Eddy & Lorenzen 1991]. Die Realisierung und Implementierung erfordert folgende Schritte: Zunächst werden die gegebenen Parzellen (Flurstücke) in folgende drei Klassen klassifiziert: 'Wohnbau-', 'Industrieflurstück' und 'Flurstück gemischter Nutzung'. Diese Zuordnung ergibt sich aufgrund der Klassifikation des auf ihm stehenden Gebäudes. Anschließend werden Flurstücke gleichen Typs zusammengefasst. Diese Aggregation basiert auf topologischer Nachbarschaft. Hiermit entstehen die ATKIS Objekte 'Wohnbaufläche', 'Industrie- und Gewerbefläche', sowie 'Fläche gemischter Nutzung'. Abbildung 4.6 zeigt eine Überlagerung des Ausgangsdatensatzes mit den drei abgeleiteten Objektklassen in unterschiedlichen Grautönen.

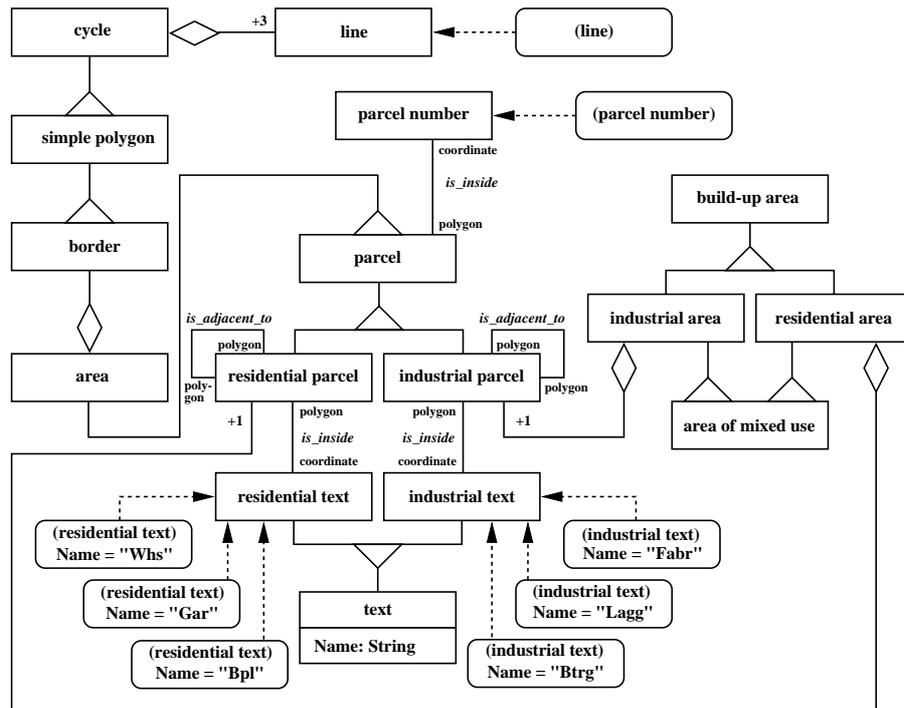


Abbildung 4.5: Semantisches Modell der Flurstücke und Siedlungsflächen.



Abbildung 4.6: Siedlungsflächen generiert aus ALK-Daten (schwarze Linien): Wohnbaufläche (helles Grau), 'Fläche gemischter Nutzung' (Grau), sowie 'Industrie- und Gewerbefläche' (dunkles Grau).

Die bisher vorgestellten Ansätze können nur so lange greifen, als die Nachbarschaft durch direkte Adjazenz ausgedrückt werden kann. Sollen jedoch höherwertige Strukturen abgeleitet werden, müssen mögliche Lücken zwischen den Objekten in Betracht gezogen werden. Hierzu gilt es höhere Strukturen zu erkennen, was mit Hilfe von Cluster-Algorithmen möglich ist. Diese erlauben eine andere Art der Nachbarschaftsbeschreibung, die nicht nur räumliche Nähe, sondern auch thematische Nähe, d.h. Ähnlichkeit, berücksichtigen.

Probleme treten zudem auf, wenn (kleinere, unbedeutende) Objekte, die zwischen den Siedlungsflächen liegen, ignoriert werden sollen. So werden beispielsweise kleinere Wege zu einer Siedlungsfläche hinzugenommen, größere jedoch nicht. Hier stellt sich die Frage nach den Schwellwerten, die einen kleineren von einem größeren

Weg unterscheiden. Auch der Kontext spielt hier eine Rolle, da ein kleiner Weg außerhalb einer geschlossenen Ortschaft mitunter als bedeutend angesehen wird und erhalten bleiben muss.

4.3.4.3 Lernen von Regeln für die Aggregation

van Smaalen [1996] schlägt ein Verfahren vor, welches ebenfalls von einem formalen Modell der Situation ausgeht, und dieses anhand eines Regelwerks in eine generalisierte Darstellung überführt. Die Generalisierungsregeln sind Weglassen, Klassifizieren und Aggregieren. Wann welche Operation angewandt wird, hängt vom jeweiligen Objekt und vom Kontext ab. Dieses Regelwerk aufzustellen ist daher nicht trivial. Insbesondere geht es um die Bestimmung der Nachbarschaft zwischen den Objekten, die für eine Aggregation (bzw. Integration) verantwortlich ist. Da diese Beziehungen üblicherweise in einem Datensatz nur implizit vorliegen, ist sein Ziel, diese explizit zu machen. Um festzustellen, welche Objekte aggregiert werden dürfen, also zusammengesetzte Objekte bilden, werden die Nachbarschaftsverhältnisse aller Objekte des Datensatzes betrachtet. Mit einer Art von Data Mining Technik werden die (geometrischen) Beziehungen zwischen allen Objekten des Datensatzes ermittelt und festgestellt, ob und wo sich Häufigkeiten herausstellen. So kann z.B. zwischen einem Gebäude und einem Flurstück eine häufige Relation festgestellt werden, so dass sich die Frage ergibt, ob sich daraus nicht eine Regel ableiten lässt (z.B. Haus liegt-in Flurstück). Ein sogenannter 'Experte' ist dafür verantwortlich, die verschiedenen Vorschläge zu sichten, und diese als Regel zu akzeptieren oder zu verwerfen. Weiterhin ist es möglich, zusammengesetzte Objektklassen zu bilden, indem betrachtet wird, ob viele Objektklassen eine Beziehung zu einer anderen Klasse haben. Zum einen kann festgestellt werden, dass die Objekt zu einer gemeinsamen Oberklasse gehören, zum anderen kann ein Relationentyp generiert werden.

Nach der Neu-Klassifizierung muss es jedoch noch möglich sein, etwaige übergeordnete geometrische, thematische oder topologische Eigenschaften zu berücksichtigen. So ergeben sich etwa räumliche Muster in Form von Netze oder Objekte unterschiedlicher räumlicher Dichte. Dies kann dazu führen, dass Objekte einer anderen Objektklasse 'zugeschlagen' werden. Im Beispiel ist es eine Sackgasse, die in den Gebäudeblock integriert wird, da sie zum einen zu kurz, und zum anderen für das Straßennetz unerheblich ist.

Der Ansatz von Sester [2000] versucht ebenfalls das Problem der Ermittlung der relevanten Regeln zu lösen – was oft auch als 'Knowledge Acquisition Bottleneck' bezeichnet wird. Hierzu werden Maschinelle Lernverfahren eingesetzt. Im überwachten Lernprozess markiert der Lehrer 'interessante' Beziehungen in den Daten. So kann er beispielsweise die Beziehung einer Straße und eines Radwegs markieren, oder die zwischen zwei Flurstücken. Auch kann er Objekte markieren und sie einer Klasse zuweisen, und damit Modellbeschreibungen von Objekten lernen. Das zugrundeliegende Lernverfahren (hier ID3 [Quinlan 1986]) ermittelt aus diesen Vorgaben die Klassifizierung, einen Entscheidungsbaum in dem die Attribute, ihre Werte sowie ihre Kombination spezifiziert ist.

Der Vorteil dieses Ansatzes ist, dass die Regeln applikationsspezifisch abgeleitet werden können. Es fällt dem Menschen leicht, Situationen oder Regelmäßigkeiten zu erkennen, jedoch die genaue Spezifikation der Situation ist schwierig. Hier soll das Lernverfahren helfen. Die Abbildungen 4.7 und 4.8 zeigen, wie Nachbarschaftsbeziehungen zwischen unterschiedlichen Objekten gelernt werden. Nachbarschaftsbeziehungen sind dabei durch eine Verbindungslinie zwischen den Objekten gekennzeichnet. Offensichtlich gelten für unterschiedliche Objekte unterschiedliche Nachbarschaftsbeziehungen. Diese müssen daher objekt- und anwendungsspezifisch ermittelt werden.

Im Gegensatz zum Verfahren von van Smaalen [1996], welches zunächst unüberwacht arbeitet, werden hier gezielt die Relationen, Konzepte offengelegt bzw. explizit gemacht, welche der Nutzer als relevant erkennt – ohne dass er wissen muss, *warum* diese relevant sind, und wie diese Konzepte berechnet werden können.

Allen diesen Ansätzen ist gemeinsam, dass sie lokal arbeiten, d.h. iterativ für die jeweils zu aggregierenden Objekte prüfen, in welchem übergeordneten Objekte sie aufgehen können. Globale Eigenschaften können somit nicht berücksichtigt werden.

4.3.4.4 On-the-fly-Generalisierung

Der Ansatz von Glover & Mackaness [1999] zielt auf eine on-the-fly-Generalisierung für die applikationsabhängige Darstellung von räumlichen Datenbeständen im Internet ab. Diese dynamische Generalisierung baut auf einem

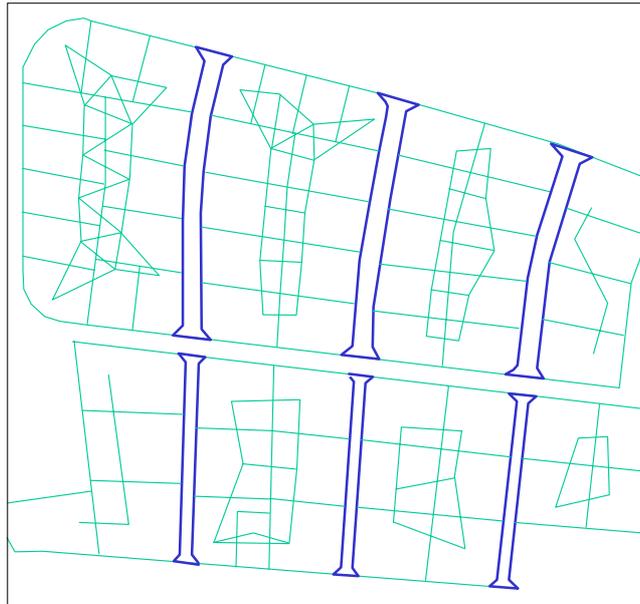


Abbildung 4.7: Gegeben: Flurstücke und Straßen (fette Linien): Ableitung der Nachbarschaftsbeziehung von Flurstücken (gekennzeichnet durch Verbindungslinien zwischen den Flurstücken); wichtig ist zu sehen, dass keine Nachbarschaft über die Straßen hinweg existiert.

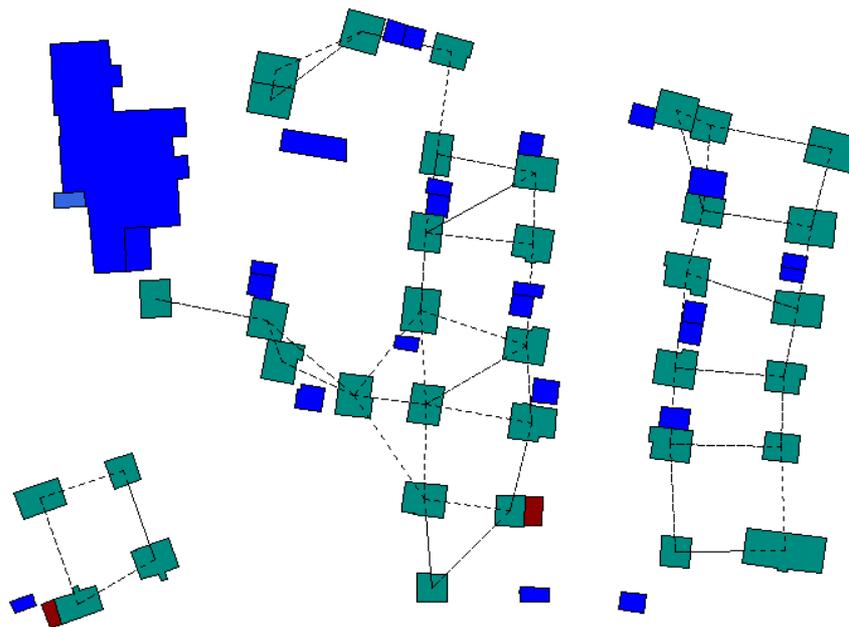


Abbildung 4.8: Ableitung der Nachbarschaftsbeziehung von Gebäuden: Wohngebäude, zwischen denen die gesuchte Beziehung gilt, sind durch gestrichelte Linien miteinander verbunden.

einigen, hoch detaillierten Datenbestand auf, welcher bei Bedarf generalisiert wird. Hiermit wird – ähnlich wie van Oosterom [1995] – die Redundanz vermieden. Auch wird damit garantiert, dass die Daten immer aktuell und über alle Maßstäbe hinweg konsistent sind. In größeren Maßstäben werden zunächst Objekte vereinfacht bzw. weggelassen. Der Maßstabsübergang von 1:10.000 nach 1:50.000 erfordert Aggregation. Diese erfolgt hier durch Betrachtung der lokalen Nachbarschaft eines Objektes und das Bilden der konvexen Hülle. Für zwei konkrete Applikationen – topographische Karte und Tourismuskarte – wurden spezifische Regelsätze erstellt, welche die Repräsentation der Objekte in vier diskreten Maßstabsbereichen beschreiben. Der Ansatz liefert ansprechende

Ergebnisse, wobei eine Konzentration auf die Darstellung von Gebäuden und ihren Aggregationsformen erfolgte. Prinzipiell ermöglicht das Verfahren, eine Ableitung von Darstellungen 'on-demand' und 'on-the-fly'. Diese können jeweils applikationsspezifisch aus dem Grunddatenbestand abgeleitet werden, und müssen nicht vorgehalten werden.

4.4 Hierarchische Datenanalyse

Die hierarchische Datenanalyse nutzt nicht nur die räumliche und thematische Information eines Datensatzes, sondern darüber hinaus auch noch die maßstabsabhängige Komponente. Zusammenhänge zwischen Objekten können somit neben der geometrischen Überlagerung oder der thematischen Verknüpfung auch zusätzlich noch bezüglich des Maßstabs bestimmt werden. Somit ist es möglich, auch benachbarte Aggregationsniveaus für den Informationsgewinn zu nutzen.

Damit werden neue Methoden der Datenvisualisierung und Datenanalyse möglich, etwa der logische Zoom, welcher beim Annähern nicht lediglich eine Vergrößerung der Situation zeigt, sondern mehr Details. Weiterhin ist die Möglichkeit gegeben, Objekte zu selektieren und im größerem Maßstab, d.h. in der besseren Auflösung zu inspizieren. Schließlich kann Analyse über mehrere Maßstäbe hinweg integriert werden. Viele Fragestellungen bedürfen dieser integrierten Behandlung von globalen und lokalen Aspekten. Die Standortplanung für ein Kaufhaus kann beispielsweise weder alleine auf der detaillierten Ebene einzelner Häuser, noch auf der globaleren Ebene von Siedlungsgebieten alleine beantwortet werden – beide Aspekte sind zu integrieren. Damit können Analysen auf einem sehr abstrakten Niveau durchgeführt werden und dennoch die genaue Detailinformation benutzen. Grundsätzlich wird erreicht, dass die Analyse bezüglich eines Datensatzes durchgeführt werden kann, obwohl entsprechende Informationen nicht direkt in diesem gespeichert sind. Ein Beispiel wurde von Gabay [1997] erarbeitet und prototypisch innerhalb von ArcView realisiert: Auf einem ATKIS-Datensatz kann eine Anfrage nach Anzahl und Typ der Gebäude, die in Siedlungsflächen liegen, gestellt werden. Dies ist möglich, weil eine explizite Verbindung zwischen den Objekten von ATKIS mit den Gebäuden der ALK vorab gegeben ist.

Eine weitere Form der hierarchischen Datenanalyse ist das räumliche Schließen [Papadias & Egenhofer 1997]. Eine explizite Modellierung von räumlichen Beziehungen kann entfallen, wenn sie aus der hierarchischen Darstellung erschlossen werden können. Ausgangspunkt sind hier Punkte und Flächenobjekte, deren relative Lage zueinander in Form von Himmelsrichtungen sowie Inklusionsbeziehung bekannt ist. Durch die Inklusion entsteht eine hierarchische Struktur. Die Relation zweier Objekte kann aus der Relation ihrer übergeordneten Objekte abgeleitet werden. Dies kann für die Aufdeckung von Inkonsistenzen, die z.B. durch falsche Eingaben erzeugt worden sind, genutzt werden. Die Inferenzen sind möglich, da eine explizite Semantik der Relationen in Form von Wissen über Himmelsrichtungen und relative Positionen existiert. Ein ähnlicher Vorschlag von Jones & Luo [1994] nutzt ein deduktives Datenbankschema, um räumliche und thematische Schlußfolgerungen aus den Daten zu ziehen. Auf diese Weise können Informationen abgeleitet werden, die in der Datenbank nicht explizit gespeichert sind. z.B. Enthaltensein, aber auch Ableitungen aus Klassifikationshierarchien. Wichtig ist dabei jedoch, dass die Relationen auf höherer Stufe der Hierarchie auch noch immer Gültigkeit besitzen. Ein populäres Gegenbeispiel hierfür ist das Nevada – Problem: Nevada liegt östlich von Californien. Carson City liegt in Nevada, El Centro liegt in Californien. Nutzt man die Regel, dass die übergeordnete Relation auch für Untermengen der Objekte gilt, so könnte man daraus schließen, dass auch Carson City östlich von El Centro liegt – was aber nicht der Fall ist.

Ein ähnliches Problem betrifft die Aggregation von Objektinformation: Bei der Aggregation von Attributen und Bewertung kommt es nicht nur auf die Anzahl der Objekte einer Kategorie an, sondern auch auf deren Verteilung. Treten beispielsweise Schadstoffkonzentrationen an einem Ort gehäuft auf, ist dies als gefährlicher einzustufen, als wenn sie über das gesamte Gebiet verteilt sind. Dies ist vor der Aggregation an die nächsthöhere Stufe zu überprüfen.

Molenaar [1996a] beschreibt, wie die Berechnung der Erosionsgefährdung durch reine räumliche und thematische Aggregation zu falschen Ergebnissen führen kann. Beurden & Douven [1999] beschreiben den Effekt, den eine unterschiedliche Abfolge der Operationen hat: wird zunächst eine Aggregation durchgeführt und anschließend darauf die Operation berechnet, ergibt sich ein anderes Ergebnis, als wenn zunächst die Operation auf dem

detaillierten Datenbestand berechnet wird und das Ergebnis aggregiert wird. Daher empfehlen die Autoren, eine Sensitivitätsanalyse in Form eines Vergleichs der verschiedenen Ergebnisse.

Grundsätzlich handelt es sich bei der Analyse um ein komplexes Interpretationsproblem, wie es aus der Bildanalyse hinlänglich bekannt ist. Daher können hier auch die gleichen Methoden eingesetzt werden, z.B. modellbasierte Ansätze. Aufgrund der Komplexität dieser Probleme werden in der Bildanalyse üblicherweise hierarchische Verfahren eingesetzt, die hier gleichermaßen Verwendung finden können.

Als spezielles Analyseproblem wird im Folgenden die Datenfortführung im Detail behandelt, und mögliche Lösungen skizziert.

4.4.1 Fortführung räumlicher Datenbestände

Die Aktualisierung und Fortführung räumlicher Datenbestände stellt ein großes Problem dar. Neben der Primärdatenerfassung ist dafür zu sorgen, dass die Datenbestände 'immer aktuell' sind. Diese Aktualitätsforderung ist für unterschiedliche Datenbestände unterschiedlich hoch: Straßendaten, die für Navigationszwecke eingesetzt werden, erfordern eine Tagesaktualität, während andere topographische Objekte, z.B. Vegetationsgrenzen nicht so starken Änderungen unterworfen sind, und daher nicht so häufig fortgeführt werden müssen.

Idealerweise sollte die Fortführung auf Basis eines maßstabsabhängigen Schemas lediglich auf dem hochauflösten Datenbestand erfolgen – durch Generalisierung lassen sich danach die Repräsentationen in den Folgemaßstäben ableiten.

Die Fortführung lässt sich in folgende Komponenten gliedern:

1. Datenerfassung der Änderungen.
2. Eintragen der Änderungen in den Datenbestand.
3. Propagierung der Änderungen in die Folgemaßstäbe.

4.4.1.1 Erfassung der Änderung

Die Datenerfassung erfolgt typischerweise durch Vergleich der aktuellen Situation mit dem bestehenden Datenbestand. Für den Fall des ATKIS-Datenbestandes wird dies typischerweise auf Basis von Orthophotos aus aktuellen Befliegungen durchgeführt. Ein Operateur hat dabei die Aufgabe, das Bild systematisch nach Änderungen zu durchforsten.

Für die Automation dieses Prozesses wurden Karten bzw. GIS-basierte Lösungen vorgeschlagen ([Plietker 1994, Vögtle & Schilling 1995, Bückner, Koch & Pakzad 1999]. Walter [1999] überlagert den alten DLM-Datenbestand dem Orthophoto. Mittels einer Multispektralklassifizierung können anschließend Objektklassen ermittelt werden. Als Trainingsgebiete für die Maximum-Likelihood-Klassifizierung dienen dabei die 'alten' ATKIS-Daten. Hintergrund dieses Ansatzes ist die Annahme, dass der größte Teil der Daten sich nicht verändert hat. Ein Vergleich des Ergebnisses der Klassifikation mit den ursprünglichen ATKIS-Daten erfolgt anschließend objektweise. Es kann somit ermittelt werden, ob 1) eine weitgehende, 2) eine teilweise, jedoch zweifelhafte oder 3) überhaupt keine Übereinstimmung gefunden werden kann. Diese Flächen werden farblich markiert und können so vom Operateur geprüft werden. Eine wesentliche Untersuchung des Projekts von Walter [1999] bestand darin, festzustellen, welche Datenquellen sich für diese automatische Fortführung eignen. Prinzipiell konnte gezeigt werden, dass Satellitendaten bzw. Luftbilddaten im Bereich von 2 bis 5m Auflösung ideal für die Änderungsdetektion sind. Problematisch ist dabei jedoch die Überprüfung: wenngleich eine Änderung festgestellt werden kann, ist die Verifikation, bzw. die anschließende Messung des neuen Objektes in dieser Auflösung nicht möglich – hier wird mindestens eine Auflösung von 0.5m benötigt.

Grundsätzlich existiert eine Vielzahl von Verfahren zur bildbasierten Erkennung von topographischen Objekten. In den letzten Jahren wurde im Bereich der Vermessung, Bildanalyse, Computer Vision verstärkt an der Erkennung anthropogener Objekte aus Bildern gearbeitet. Im Vordergrund standen hierbei Straßen [Airault, Ruskone & Jamet 1994, de Gunst & Vosselman 1997, Hinz, Baumgartner, Steger, Mayer, Eckstein, Ebner & Radig 1999],

Gebäude ([Grün, Kübler & Agouris 1995, Grün, Baltsavias & Henricsson 1997, Haala & Brenner 1999, Fischer, Kolbe & Lang 1999, Quint 1997]), aber auch Vegetation ([Vögtle & Schilling 1995, Hahn & Stätter 1998]). Die Verfahren unterscheiden sich u.a. darin, wie und in welchem Maße Vorinformation in den Erkennungsprozess mit eingebracht wird. Für einen Überblick über die Verfahren siehe [Mayer 1998a].

4.4.1.2 Eintragen der Änderungen in den Datenbestand

Im Anschluss an die Erfassung neuer Information gilt es, diese in den alten Datenbestand zu integrieren. Dafür sind die Beziehungen zwischen alter und neuer Situation zu analysieren. Hier können verschiedene Situationen auftreten, die anhand der Kardinalität der Beziehungen vor und nach der Änderung charakterisiert werden können [Badard 1999]. Diese Änderungen beziehen sich zunächst auf die Geometrie:

- ▷ 1:0 – Objekt verschwindet.
- ▷ 0:1 – Neues Objekt entsteht.
- ▷ 1:n – Objekte werden geteilt.
- ▷ n:1 – Objekte werden zusammengefasst.
- ▷ n:m – Objekte werden aggregiert.
- ▷ 1:1 – Objekte haben korrespondierende Geometrie.

Neben der Geometrie ist auch die Thematik aufzudatieren.

Ist auf diese Weise ein aktueller Datensatz erstellt, so kann er an potentielle Nutzer weitergegeben werden. Ein Problem, welches sich hier stellt ist die Frage, ob diese den gesamten neuen Datenbestand einlesen müssen, oder nur die Änderungen. Im ersten Fall müssen die Nutzer sämtliche Prozesse, die sie bereits auf den Daten durchgeführt haben, wiederholen, um den Datenbestand wieder an ihre Bedürfnisse anzupassen. Dies ist natürlich nicht wünschenswert. Daher ist eine partielle Aufdatierung lediglich der Änderungen vorzuziehen. Dies setzt voraus, dass die Änderungen im Datenbestand lokalisiert, und dort entsprechend eingetragen werden können. Es stellt sich also das gleiche Problem wie oben beschrieben. Liegen eindeutige Objektidentifikatoren vor, so liegen die aufzudatierenden Objekte fest. Andernfalls müssen diese zunächst mittels Matching-Techniken lokalisiert werden [Badard 1999].

Diese Überlegungen gelten allgemein für die Aktualisierung. Darüber hinaus können die Regeln nun erweitert werden, um auch noch die Propagierung der Änderungen in die abgeleiteten Maßstäbe zu ermöglichen.

4.4.1.3 Propagierung der Änderungen in die Folgemaßstäbe

Für die Änderungspropagierung ist zu klären, welche Objekte im Folgemaßstab überhaupt repräsentiert werden sollen, sowie, in welcher Form sie dargestellt werden. Hierzu existieren konzeptionelle Vorschläge [Kilpeläinen 1996] bzw. prototypische Realisierungen [Harrie & Hellström 1999]. Prinzipiell geht man davon aus, dass die Verbindungen einzelner Objekte zwischen den Maßstabsbereichen gegeben sind. Dies wird entweder von Hand durchgeführt, oder über Matching-Verfahren erreicht (vgl. Kapitel 4.1.2).

Das Konzept der inkrementellen Generalisierung von Kilpeläinen [1996] basiert auf einer maßstabsabhängigen Darstellung von Objekten. Die Idee ist dabei eine Modularisierung von Geoobjekten, die unabhängig voneinander generalisiert werden können. Der kritische Punkt dieses Ansatzes ist die Bestimmung dieser separierbaren Module, da sie nicht nur die Objekte selbst enthalten, sondern auch noch ihre gesamte Kontextinformation, sowie die nötigen Generalisierungsschritte. Das Konzept zielt darauf ab, individuelle Änderungen direkt in die Folgemaßstäbe zu propagieren, ohne dass der gesamte Datenbestand neu generalisiert werden muss.

Uitermark et al. [1998] beschreiben eine Fortführungsstrategie für die Topographische Karte 1:10.000 aus Katasterdaten. Sie wurde exemplarisch für Gebäude durchgeführt. Die Zuordnung der Datensätze erfolgt durch eine geometrische Überlagerung, d.h. die Verbindungen zwischen den Maßstäben werden durch Verschneidung

erreicht. Objekte gelten als korrespondierend, wenn sie zu einem gewissen, vorzugebenden, Prozentsatz überlappen [van Wijngaarden, van Putten, van Oosterom & Uitermark 1997]. Die Zuordnungen zwischen den Objekten werden anschließend auf ihre Konsistenz hin untersucht. Dies kann aufgrund der Spezifikationen der beteiligten Datensätze beantwortet werden. Wird eine 1:0-Relation gefunden, so muss geprüft werden, ob das Datenmodell eine solche Beziehung zwischen den beteiligten Objekten vorsieht, und ob im konkreten Fall die Voraussetzungen hierfür gegeben sind. Beim Übergang von der Katasterkarte in die Topographische Karte wird ein Gebäude beispielsweise eliminiert, wenn es zu klein ist, oder in einer Siedlungsfläche, nicht aber in der Nähe einer Zugangsstraße liegt. Alle Zuordnungen müssen so auf ihre Konsistenz hin geprüft werden. Die Fortführung basiert anschließend auf diesen Relationen. Liegt etwa eine n:1-Relation vor, so müssen die Gebäude aggregiert werden. Filter dienen dazu, nicht relevante Daten (zu kleine Gebäude) zu eliminieren. Auch gilt es, mögliche Kleinformen durch Grundrissvereinfachung zu beseitigen, bevor sie an den Folgemaßstab übergehen.

Der Ansatz von Harrie [1998] geht darüber hinaus, indem er nicht nur Objekte einer Klasse berücksichtigt, sondern auch noch den Kontext in Form weiterer Objekte. Ausgangspunkt ist eine maßstabsabhängige Darstellung, bei der die Zuordnungen von Hand erstellt worden sind. Für die Fortführung sind zunächst die Zusammenhänge zwischen Ursprungs- und Zieldatenbestand zu klären. Dies kann aufgrund einer Untersuchung von Erfassungsvorschriften und Objektartenkatalogen, aber auch auf Basis existierender Karten geschehen. Diese Zusammenhänge sind anschließend in computerverarbeitbare Regeln zu überführen. Hiermit kann schließlich die eigentliche Fortführung erfolgen, und die Objekte in den Zieldatenbestand überführt werden. Zusätzlich muss sichergestellt werden, dass die Topologie des Zieldatenbestandes konsistent bleibt (z.B. darf ein Gebäude nicht auf eine Straße platziert werden). Nach diesen Schritten der Modellgeneralisierung erfolgt schließlich die kartographische Generalisierung, indem die Objekte im Folgemaßstab vereinfacht, symbolisiert und gegebenenfalls verdrängt werden.

Ein Prototyp wurde für den Übergang von 1:10.000 nach 1:50.000 implementiert. Ein mögliches Regelwerk für die Fortführung eines Gebäudes spezifiziert unter anderem, dass ein Gebäude nicht übernommen wird, wenn es zu klein ist, bzw. innerhalb eines bebauten Gebiets liegt. Ist es indessen groß genug und liegt am Rand eines bebauten Gebiets, so muss dieses im Zieldatensatz erweitert werden.

Als nachteilig erweist sich, dass die Fortführung inkrementell für jedes Objekt separat erfolgt, was u.U. einer neuen Situation, die durch gleichzeitiges Entstehen mehrerer Objekte gekennzeichnet ist, nicht gerecht wird. Dies betrifft auch das grundsätzliche Problem, welches in der Analyse und Erfassung der Ausgangssituation liegt. Hier spielt nicht nur das fortzuführende Objekt mit seinen individuellen Eigenschaften eine Rolle, sondern der Kontext, in den dieses Objekt eingebettet ist. Badard & Lemarie [1999] beschreiben ähnliche Schritte für die Ableitung der Folgemaßstäbe. Aufgrund dieses Problems der Kontextabhängigkeit sehen sie allerdings noch eine manuelle Interaktionsmöglichkeit vor, falls eine Formalisierung der Propagierung nicht möglich ist.

Kidner & Jones [1994] schlagen vor, die Fortführung in ein deduktives Datenbanksystem einzubetten, wo aufgrund spezieller äußerer Gegebenheiten bestimmte Fortführungsregeln angestoßen und ausgeführt werden. Damit liegt ein formales Konstrukt vor, innerhalb dessen die Fortführung ablaufen kann. Kritisch ist jedoch die Festlegung der Situation, die eine Fortführung und ihre entsprechenden Regeln auslöst.

Grundsätzlich wird hier das gleiche Problem berührt, welches die Generalisierung als solches lösen muss: Generalisierungsregeln müssen in Abhängigkeit des Kontexts ausgeführt werden, was eine Interpretation der Szene, sowie Formalisierung räumlicher Relationen beinhaltet.

5 Lösungsvorschläge für spezielle Generalisierungsprobleme

Im Folgenden werden Lösungsvorschläge für einige Generalisierungsprobleme vorgestellt. Es sind dies ein Verfahren zur Vereinfachung von Gebäudegrundrissen, eine globale Methode zur Verdrängung (welche auch noch weitere Generalisierungsoperationen integrieren kann), sowie ein globales Verfahren zur Typifizierung von punktförmigen Objekten mittels einem Neuronale-Netze-Ansatz.

Die ersten beiden Verfahren werden dabei als Optimierungsproblem formuliert und mittels einem Kleinste-Quadrate-Ansatz gelöst. Im Anhang A ist eine kurze Übersicht über Optimierungsverfahren gegeben, wobei eine Konzentration auf die hier verwendeten Methoden erfolgt.

5.1 Formvereinfachung am Beispiel der Gebäudegeneralisierung

Beim Übergang von einem großen in einen kleinen Maßstab geht es darum, Objekte entsprechend ihres jeweiligen Typs zu vereinfachen. Bei der Gebäudegrundrissvereinfachung bedeutet dies, dass sowohl Eigenschaften wie Rechtwinkligkeit oder Geradlinigkeit der Gebäudekanten, als auch die typische Objektform erhalten bleiben müssen.

Der Ansatz von Staufenbiel [1973] realisiert die Generalisierung auf Basis einer Art von Regelwerk. Dieses legt im Detail fest, was mit Gebäudefassaden geschieht, die für den darzustellenden Maßstab zu kurz sind. Besondere Bedeutung kommt dabei der Bestimmung der neuen Geometrie zu. Vorliegender Ansatz verwendet ähnliche Regeln – sie sind jedoch von deutlich einfacherer Gestalt. Diese Vereinfachung ist möglich, weil durch Anwendung der Regeln lediglich eine Näherungslösung gesucht wird. Diese wird anschließend mittels eines Ausgleichungsansatzes verbessert. Hierdurch wird erreicht, dass der generalisierte Grundriss optimal auf die eigentliche, ursprüngliche Gebäudeform angepasst wird. Damit handelt es sich bei dem Ansatz um eine modellbasierte Ausgleichung.

Der Ansatz besteht aus zwei Schritten: Zunächst wird eine näherungsweise Generalisierung erreicht, indem Gebäudeseiten, die kleiner als ein vorgegebener Schwellwert sind, eliminiert und ersetzt werden. Aus dem so erhaltenen vereinfachten Grundriss wird ein Modell des Gebäudes erzeugt, welches anschließend an den ursprünglichen Grundriss angepasst wird. Als Modell wird dabei eine parametrische Darstellung gewählt, welche das Gebäude als Funktion von Breiten- und Längenwerten in den Hauptrichtungen des Gebäudes darstellt – im einfachsten Fall eines rechteckigen Gebäudes sind dies die zwei Parameter Länge und Breite. Diese Modellierung ermöglicht implizit, dass genähert rechtwinklige Kanten exakt rechtwinklig gestellt werden.

Die Gebäudeparameter sind die Unbekannten, die in der anschließenden Ausgleichung optimiert werden. Als Beobachtungen werden die ursprünglichen Gebäudeseiten angesetzt, welche als Funktion der unbekanntenen Gebäudeparameter dargestellt werden. Im stochastischen Modell wird die Genauigkeit – und damit die Variationsmöglichkeit – einer Kante festgelegt.

Durch diesen zweistufigen Ansatz kann die aufwendige Bestimmung der Geometrie der Gebäudeseiten entfallen. Ferner lassen sich noch weitere Größen im Ausgleichungsprozess bestimmen bzw. festhalten, beispielsweise kann vorgegeben werden, dass die Gebäudegrundflächen erhalten bleiben. Ein wichtiger Punkt ist die Beurteilung der Güte des Ergebnisses anhand des mittleren Fehlers der Gewichtseinheit σ_0 , welcher nach der Ausgleichung berechnet werden kann.

5.1.1 Ableiten eines vereinfachten Grundrisses

Der wesentliche Parameter des Verfahrens ist die minimale Länge, die eine Gebäudeseite in der generalisierten Darstellung aufweisen muss, der Parameter *EPSdist*. Der vereinfachte Grundriss entsteht durch eine lokale Betrachtung der zu kurzen Gebäudekanten.

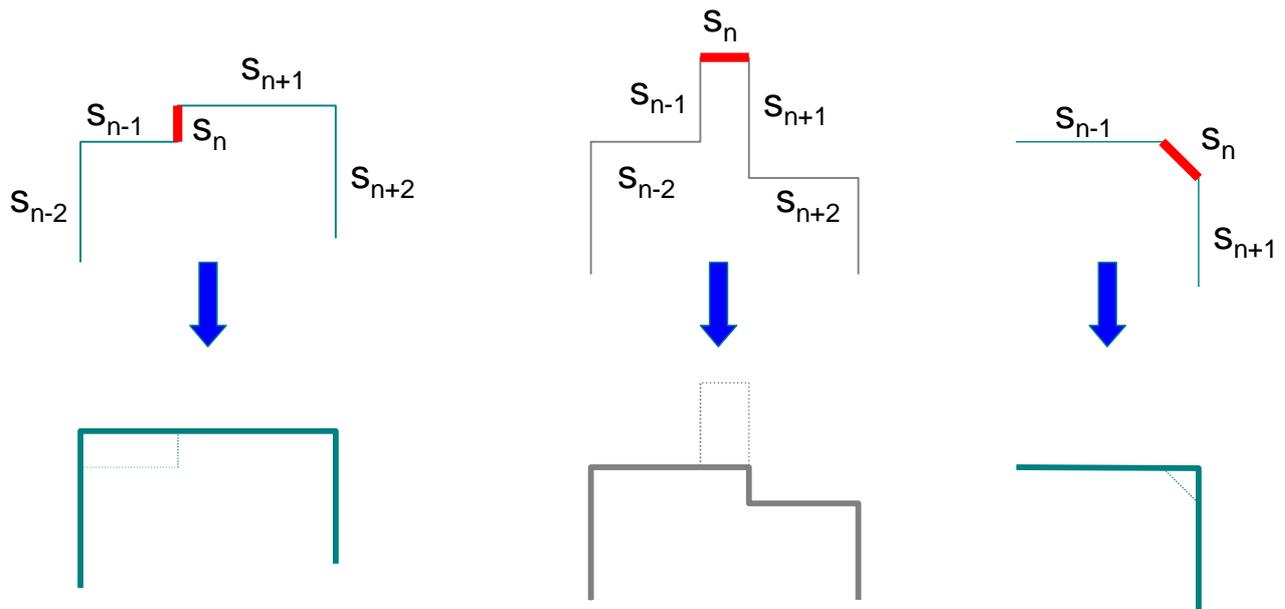


Abbildung 5.1: *Elimination zu kurzen Kanten s_n : Versatz, Ausbuchtung und Ecke (die zu kurzen Kanten sind fett dargestellt).*

Für jede zu kurze Kante s_n werden drei verschiedene Fälle unterschieden, und zwar entsprechend der Richtungen der benachbarten Vorgänger- und Nachfolgerkanten s_{n-1} und s_{n+1} (Abbildung 5.1):

- Vorgänger und Nachfolger haben die gleiche Richtung:** hier liegt ein Versatz vor. Die längere Nachbarkante wird verlängert und mit der entsprechenden Folgekante geschnitten. D.h.:
 - ▷ s_{n-1} ist länger: diese Kante wird mit der Kante s_{n+2} geschnitten; die Kanten s_{n+1} und s_n entfallen.
 - ▷ s_{n+1} ist länger: diese Kante wird mit der Kante s_{n-2} geschnitten; die Kanten s_{n-1} und s_n entfallen.
- Vorgänger und Nachfolger haben entgegengesetzte Richtungen:** hier liegt eine Ausbuchtung oder eine Einbuchtung vor. Wieder kann entsprechend der Längen der Nachbarkanten die Folgeoperation unterschieden werden:
 - ▷ s_{n-1} ist länger: die Kante s_{n+2} wird mit der Kante s_{n-1} geschnitten; die Kanten s_{n+1} und s_n entfallen.
 - ▷ s_{n+1} ist länger: die Kante s_{n-2} wird mit der Kante s_{n+1} geschnitten; die Kanten s_{n-1} und s_n entfallen.
- Zwischen Vorgänger und Nachfolger ist ungefähr ein rechter Winkel:** die Kanten s_{n-1} und s_{n+1} werden geschnitten, die Kante s_n entfällt.

Diese Operation wird für alle Kanten durchgeführt, die kürzer als der Schwellwert sind. Nach jeder Veränderung muss die Iteration wieder über alle Kantenstücke erfolgen, da durch die Änderung neue kurze Kanten entstanden sein können.

In manchen Fällen dürfen Gebäudestrukturen jedoch nicht einfach wegfallen, sondern müssen betont werden: Ein langer, schmaler Anbau eines Gebäudes stellt beispielsweise ein bedeutendes Teil dar und muss erhalten bleiben, selbst wenn die schmale Seite kürzer als die Minimaldistanz ist. Kriterium ist hier die Fläche des Anbaus, die einen Schwellwert überschreiten muss. In solchen Fällen wird die kurze Seite auf die Minimaldistanz vergrößert, und somit betont.

Nachdem alle kurzen Seiten auf diese Weise abgearbeitet sind, liegt der vereinfachte Grundriss vor.

5.1.2 Berechnung eines Modells aus dem vereinfachten Grundriss

Aus dem vereinfachten Grundriss wird ein parametrisches Modell des Gebäudes abgeleitet. Dazu wird der generalisierte Grundriss mittels einer Ähnlichkeitstransformation in ein hausbezogenes Koordinatensystem überführt, d.h. in eine Darstellung des Gebäudes in Bezug auf seine beiden Hauptachsen. Bezüglich dieser Darstellung werden nun die Formparameter bestimmt. Diese entsprechen den jeweils unterschiedlichen Abschnitten auf der x- und der y-Achse (vgl. Abbildung 5.2). Im einfachsten Fall eines rechteckigen Grundrisses liegen lediglich zwei verschiedene x-Koordinaten und zwei verschiedene y-Koordinaten vor: $[\min_x \max_x]$ und $[\min_y \max_y]$. Der minimale Wert ist üblicherweise 0, der zweite gibt den Hausparameter, hier die Breite bzw. die Länge vor. Auf gleiche Weise können so alle Ausbuchtungen, Vor- und Einsprünge der Gebäude modelliert werden. Die Anzahl der Formparameter ergibt sich somit als Anzahl der verschiedenen Koordinaten in x- und in y-Richtung.

Ein zusätzlicher, optionaler Steuerparameter EPS_fract gibt hier vor, ab wann Koordinaten als gleich angesehen werden; hiermit kann die Rechtwinkligkeit des Gebäudes und die Geradlinigkeit von aufeinanderfolgenden Gebäudeseiten betont werden. Der Parameter wird sinnvollerweise relativ zur minimalen Gebäudeseite angegeben, etwa $1/10$ von $EPSdist$. Im Beispiel der Abbildung 5.2, links, ergeben sich zunächst je vier x- und y-Abschnitte: $[x_1, x_2, x_3, x_4]$ und $[y_1, y_2, y_3, y_4]$. Es wird geprüft, ob die Differenz aufeinanderfolgender Abschnitte kleiner ist als EPS_fract .

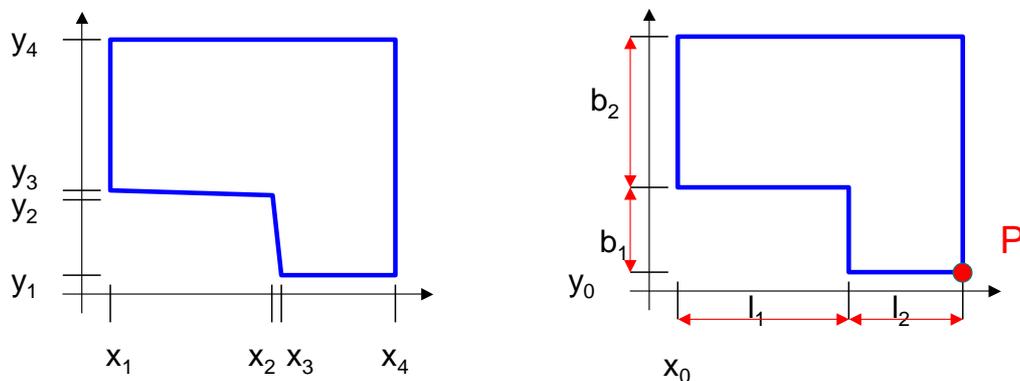


Abbildung 5.2: Bestimmung der Formparameter bezüglich der Hauptachsen des Gebäudes.

Dies trifft hier für die Werte x_2 und x_3 , sowie y_2 und y_3 zu, was bedeutet, dass diese zusammengefasst werden. Damit ergeben sich schließlich die vier angegebenen Parameter l_1, l_2, b_1, b_2 . Hinzu kommen noch zwei Parameter für die allgemeine Translation des Gebäudes: x_0, y_0 (vgl. Abbildung 5.2, rechts).

Das Gebäude ist somit in parametrischer Form dargestellt, d.h. als Funktion der hier ermittelten Formparameter. Punkt P in Abbildung 5.2 hat beispielsweise die Koordinaten:

$$\begin{aligned}x_p &= x_0 + l_1 + l_2 \\y_p &= y_0\end{aligned}$$

Vor der Weiterverarbeitung müssen diese Gebäudepunkte jedoch wieder vom Modellkoordinatensystem in das Hauskoordinatensystem zurücktransformiert werden. Somit ist jeder Punkt als Funktion der Formparameter bestimmt.

Das Ergebnis ist eine genäherte Form des Gebäudes. Diese Repräsentation kann prinzipiell schon als generalisiertes Gebäude angesehen werden. In der anschließenden Prozessierung wird eine optimal angepasste Form des Gebäudes ermittelt, indem ein Ausgleichsprozess die Modellkanten und die echten Gebäudekanten zusammenführt.

5.1.3 Ausgleichungsansatz

Zu jeder Modellkante werden alle möglichen Hauskanten gesucht. Ein Kandidat ist eine Hauskante, die eine ähnliche Richtung hat und innerhalb eines Puffer von $\pm EPSdist$ um die Modellkante liegt.

5.1.3.1 Funktionales Modell – die Beobachtungsgleichungen

Jede der möglichen Modell-Haus-Kantenzuordnungen liefert vier Beobachtungsgleichungen, nämlich die x/y-Koordinaten von Anfangs- und Endpunkt. Jede Beobachtung wird in Abhängigkeit der Formparameter beschrieben. Diese funktionale Beziehung wurde im Vorverarbeitungsschritt ermittelt, wo jeder Gebäudepunkt als Funktion der Formparameter bestimmt wurde.

5.1.3.2 Stochastisches Modell der Kanten

Um die Genauigkeitseigenschaften der Kante festzulegen, wird diese im Koordinatensystem (u,v) dargestellt, in dem der Schwerpunkt der Kante AE im Ursprung des Systems liegt und die u-Achse in Kantenrichtung weist.

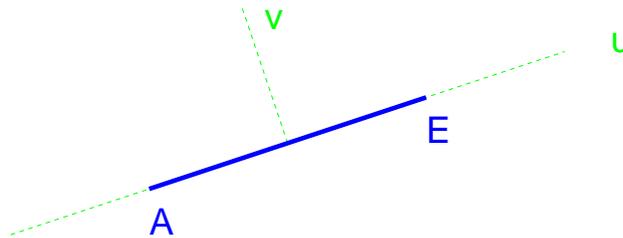


Abbildung 5.3: u-v-Koordinatensystem der Kante.

Die Varianz-Kovarianz-Matrix einer Kante beschreibt ihre Genauigkeitssituation, und setzt sich zusammen aus den Genauigkeiten der u/v-Koordinaten von Anfangs- und Endpunkt, und ist somit von der Dimension 4×4 . Die v-Koordinaten sind dabei über die gemeinsame Steigung der Kante korreliert.

$$\begin{aligned} v &= a + mu \\ m &= \frac{\Delta v}{\Delta u} \\ m &= \frac{v_e - v_a}{u_e - u_a} \end{aligned}$$

Die Genauigkeit der Steigung σ_m ergibt sich durch Ableitung aus obigen Gleichungen. Hierbei wird vereinfachend angenommen, dass die Kante im u-v-Koordinatensystem gegeben ist, d.h. dass die Differenzen der v-Koordinaten 0 sind.

$$\sigma_m = \pm \frac{1}{\Delta u} \sqrt{\sigma_{v_e}^2 + \sigma_{v_a}^2}$$

Die Genauigkeit $\sigma_{v_a v_e}$ ergibt sich folgendermaßen:

$$\begin{aligned} v_a &= a + mu_a \\ v_e &= a + mu_e \\ \sigma_{v_a v_e} &= \sigma_a^2 + u_a u_e \sigma_m^2 \end{aligned}$$

Unter der Voraussetzung, dass $\sigma_a = 0$ ist, und dass der Ursprung des Koordinatensystems im Schwerpunkt der Strecke AE liegt (d.h. $u_a = u_e = \frac{\Delta u}{2}$), ergeben sich folgende Beziehungen.

$$\begin{aligned} \sigma_{v_a v_e} &= u_a u_e \frac{1}{\Delta u^2} (\sigma_{v_e}^2 + \sigma_{v_a}^2) \\ &= \frac{\Delta u}{2} \frac{\Delta u}{2} \frac{1}{\Delta u^2} (\sigma_{v_e}^2 + \sigma_{v_a}^2) \\ \sigma_{v_a v_e} &= \frac{1}{4} (\sigma_{v_e}^2 + \sigma_{v_a}^2) \end{aligned}$$

Aus den Genauigkeiten ergeben sich

$$\begin{aligned}\sigma_{v_a v_e} &= \sigma_0^2 q_{v_a v_e} \\ q_{v_a v_e} &= \frac{1}{4}(q_{v_e}^2 + q_{v_a}^2)\end{aligned}$$

Die Varianz-Kovarianz-Matrix lautet:

$$C(u, v) = \sigma_0 * Q = \sigma_0 * \begin{bmatrix} q_{u_a} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_{v_a} & 0 & q_{v_a v_e} \\ 0 & 0 & q_{u_e} & 0 \\ 0 & q_{v_a v_e} & 0 & q_{v_e} \end{bmatrix}$$

mit $P = Q^{-1}$ ergibt sich die Gewichtsmatrix im Kantensystem:

$$P(u, v) = \begin{bmatrix} \frac{1}{q_{u_a}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{q_{v_e}}{D} & 0 & -\frac{q_{v_a v_e}}{D} \\ 0 & 0 & \frac{1}{q_{u_e}} & 0 \\ 0 & -\frac{q_{v_a v_e}}{D} & 0 & \frac{q_{v_a}}{D} \end{bmatrix}$$

mit $D = q_{v_a} q_{v_e} - q_{v_a v_e}^2$. Damit hat $P(u, v)$ die Struktur

$$P(u, v) = \begin{bmatrix} W1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & W2 & 0 & W5 \\ 0 & 0 & W3 & 0 \\ 0 & W5 & 0 & W4 \end{bmatrix}.$$

Setzt man die Genauigkeiten der Anfangs- und Endpunkte senkrecht zur Kante (in v -Richtung) gleich, so ergibt sich:

$$\begin{aligned}q_v &= q_{v_a} = q_{v_e} \\ q_{v_a v_e} &= \frac{1}{4}(q_v + q_v) = \frac{1}{2}q_v \\ D &= q_{v_a} q_{v_e} - q_{v_a v_e}^2 \\ D &= q_v q_v - \frac{1}{4}q_v^2 \\ D &= \frac{3}{4}q_v^2\end{aligned}$$

Damit werden die Werte W_i zu:

$$\begin{aligned}W1 &= \frac{1}{q_{u_a}} \\ W2 &= \frac{q_{v_e}}{D} = \frac{4}{3} \frac{1}{q_v} \\ W3 &= \frac{1}{q_{u_e}} \\ W4 &= \frac{q_{v_a}}{D} = \frac{4}{3} \frac{1}{q_v} \\ W5 &= -\frac{q_{v_a v_e}}{D} = -\frac{2}{3} \frac{1}{q_v}\end{aligned}$$

Die Genauigkeiten werden folgendermaßen ermittelt: Der Modellkante s_{modell} in Abbildung 5.4 können drei Hauskanten zugeordnet werden, wovon eine die Kante s_{haus} , die Verbindung von a und e , ist.

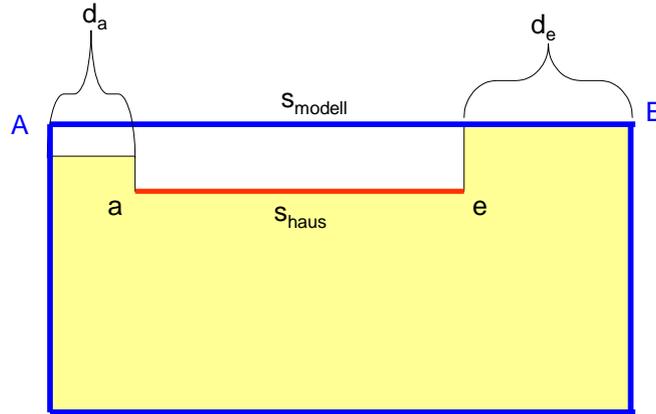


Abbildung 5.4: Bestimmung der Genauigkeiten von Gerade, Anfangs- und Endpunkt.

Die Genauigkeit q_{u_a} des Anfangspunktes a hängt ab von seiner Abweichung vom Anfangspunkt der Modellkante A , d.h. der Differenz d_a . Die Gewichtungsfunktion wird linear angesetzt: sie ist maximal für den Fall, dass die Punkte übereinstimmen und nimmt dann linear ab.

$$p_{u_a} = 1 - \frac{\text{abs}(d_a)}{s_{\text{modell}}}$$

$$q_{u_a} = \frac{1}{p_{u_a}}$$

Damit wird das maximale Gewicht erreicht, wenn die Anfangspunkte übereinstimmen. Analoges gilt für den Endpunkt.

Die Genauigkeit der Kante ist abhängig von dem Überlappungsbereich *overlap* von Modell- und Hauskante. Der Wert *rel* nimmt maximal den Wert 1 an, und reduziert sich für geringere Überlappungen.

$$rel_1 = \text{abs}(\text{overlap}/s_{\text{modell}})$$

$$rel = \min(rel_1, 1/rel_1)$$

$$q_v = \frac{EPSdist}{rel}$$

$$p_v = \frac{rel}{EPSdist}$$

D.h. für eine optimale Überlappung ergibt sich die höchste Genauigkeit.

Der Ansatz geht prinzipiell davon aus, dass im Bereich *EPSdist* um die Modellkante alle Hauskanten gleich möglich sind und daher gleich gewichtet werden. D.h. der Abstand der Hauskante von der Modellkante ist irrelevant, da er sich innerhalb der geforderten Größen befindet. Dies würde eine Betonung des genäherten Modells bedeuten, d.h. Kanten, die in Modellnähe liegen, werden höher gewichtet als andere. Diese Annahme gilt nicht mehr, wenn eine Gebäudefassade betont wurde. Dann darf der Einfluss der (richtigen), übereinstimmenden Gebäudekante nicht über dem des Modells liegen. Daher geht in einem solchen Fall auch der Abstand der Kante vom Modell ein.

Diese Gewichte gelten im Kantensystem, sie müssen ins übergeordnete Koordinatensystem (x/y-System) transformiert werden. Dies erfolgt durch eine allgemeine Transformation $R(\text{phi_haus})_{u,v}$, die von der Richtung der Kante *phi_haus* abhängt:

$$R(\text{phi_haus})_{u,v} = \begin{bmatrix} \cos & -\sin & 0 & 0 \\ \sin & \cos & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos & -\sin \\ 0 & 0 & \sin & \cos \end{bmatrix}$$

und wird erreicht durch

$$P(x, y) = R(\text{phi_haus})_{u,v} * P(u, v) * R(\text{phi_haus})_{u,v}^T$$

Damit ergibt sich für die Gewichte der Koordinaten Anfangspunkts der Geraden:

$$\begin{aligned} p_{x_a} &= \cos(\text{phi_haus})^2 * W1 + \sin(\text{phi_haus})^2 * W2 \\ p_{y_a} &= \sin(\text{phi_haus})^2 * W1 + \cos(\text{phi_haus})^2 * W2 \\ p_{x_a y_a} &= \sin(\text{phi_haus}) * \cos(\text{phi_haus}) * W2 - \sin(\text{phi_haus}) * \cos(\text{phi_haus}) * W1 \\ p_{x_a x_e} &= \sin(\text{phi_haus})^2 * W5 \\ p_{x_a y_e} &= -\sin(\text{phi_haus}) * \cos(\text{phi_haus}) * W5 \\ p_{y_a x_e} &= -\sin(\text{phi_haus}) * \cos(\text{phi_haus}) * W5 \\ p_{y_a y_e} &= \cos(\text{phi_haus})^2 * W5 \end{aligned}$$

Analoges gilt für die Gewichtung der Endpunkte mittels W3 und W4.

D.h. für eine Hauskante in x-Richtung ($\text{phi_haus} = 0$) gilt:

$$\begin{aligned} p_{x_a} &= W1 = \frac{1}{q_{u_a}} \\ p_{y_a} &= W2 = \frac{4}{3} \frac{1}{q_v} \\ p_{x_a y_a} &= 0 \\ p_{x_a x_e} &= 0 \\ p_{x_a y_e} &= 0 \\ p_{y_a x_e} &= 0 \\ p_{y_a y_e} &= W5 = -\frac{2}{3} \frac{1}{q_v} \end{aligned}$$

Für eine Hauskante in y-Richtung ($\text{phi_haus} = 90$) gilt:

$$\begin{aligned} p_{x_a} &= W2 = \frac{4}{3} \frac{1}{q_v} \\ p_{y_a} &= W1 = \frac{1}{q_{u_a}} \\ p_{x_a y_a} &= 0 \\ p_{x_a x_e} &= W5 = -\frac{2}{3} \frac{1}{q_v} \\ p_{x_a y_e} &= 0 \\ p_{y_a x_e} &= 0 \\ p_{y_a y_e} &= 0 \end{aligned}$$

5.1.4 Erweiterung – Least Squares mit Ungleichungen

Die Nebenbedingungen, die für die Unbekannten gelten, werden üblicherweise durch das funktionale Modell und die zugehörigen Gewichte modelliert. Will man allerdings Ungleichungen als Nebenbedingungen in den Prozess mit einführen, so kann das klassische Ausgleichungsmodell nicht benutzt werden. Sie können allerdings durch quadratische Optimierung mit Ungleichungen berücksichtigt werden (Hierzu wurde eine kommerziell verfügbare Funktionsbibliothek eingesetzt – vgl. Anhang A). In diesem Falle ist ein solcher Lösungsansatz sinnvoll, wenn es um die Größe der unbekanntem Formparameter geht: Das genäherte Modell wird in einem Ausgleichungsprozess an die ursprüngliche Situation angepasst. Hier kann es passieren, dass ausgeglichene Fassadenseiten entstehen, die kürzer als die ursprünglich geforderte minimale Fassadenlänge sind. Dies kann dann auftreten, wenn eine Betonung vorgenommen wurde. Die Beobachtungen – die ursprünglichen Gebäudeseiten – 'ziehen'

das Modell zurück und führen u.U. dazu, dass die Formparameter kleiner werden. Dies kann mit dem üblichen Ausgleichsmodell nicht unmittelbar gesteuert werden, obwohl eine indirekte Möglichkeit darin besteht, Modellparameter, die durch Betonen festgelegt worden sind, in der Ausgleichung als zusätzliche Parameter einzuführen und mit einem hohen Gewicht zu versehen. Dadurch werden sie quasi festgehalten.

Eine direktere und elegantere Methode ist jedoch, diese Bedingung als Ungleichung in die Ausgleichung mit einzuführen. Die zusätzlichen Beschränkungen lassen sich folgendermaßen formulieren: Für jede Modellkante wird gefordert, dass sie größer oder gleich der Minimaldistanz $EPSdist$ ist, was als Funktion der Unbekannten modelliert wird. Dies erfolgt in der G-Matrix über die zur jeweiligen Modellkante gehörenden Parameter. Die rechte Seite (H) ergibt sich aus der Differenz der Minimaldistanz und der Näherungswerte:

$$\begin{aligned} G * x &\geq H \\ G(i, n) &= \frac{\partial G}{\partial Parameter} \\ H(i) &= EPSdist - G(Parameter|_0) \end{aligned}$$

Jede Modellkante, die sich ja als Summe von Parametern ergibt, stellt somit eine Bedingung dar. Diese Bedingungen führen dazu, dass alle Fassadenseiten nach der Ausgleichung immer größer oder gleich der minimal geforderten Länge sind.

5.1.5 Beispiele für die Anwendung des Algorithmus

Die Beispiele zeigen die Anwendung des Algorithmus auf verschiedene Datenbestände. Insbesondere werden die Auswirkungen der verschiedenen Parameter gezeigt.

5.1.5.1 Lockere Bebauung

Folgende Beispiele zeigen das Ergebnis der Vereinfachung zunächst in lockerer Bebauung. Abbildung 5.5 zeigt den Effekt unterschiedlicher minimaler Fassadenlängen. Durch eine Überlagerung jeweils mit der Ausgangsdarstellung kann man die Formvereinfachung deutlich erkennen.

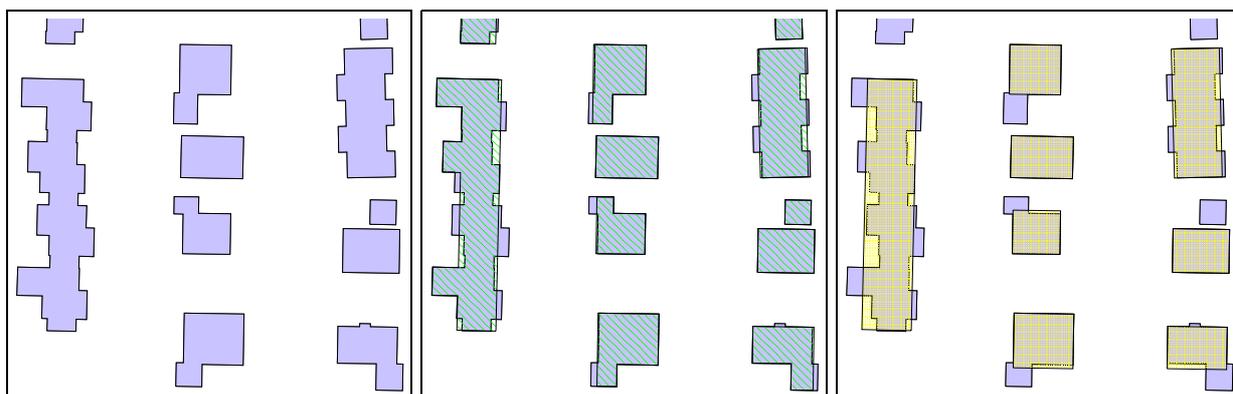


Abbildung 5.5: Ausgangssituation (links), Vereinfachung mit minimaler Fassadenlänge von 3m (Mitte), bzw. 7m (rechts) – jeweils der Ausgangssituation überlagert.

Abbildung 5.6 zeigt einen größeren Ausschnitt aus der Ortschaft 'Vimbuch', während Abbildung 5.7 die Generalisierung des gesamten Orts angibt.



Abbildung 5.6: *Vimbuch – größerer Ausschnitt: Originalsituation (links), Vereinfachung mit minimaler Fassadenlänge von 3m (Mitte), Vereinfachung mit minimaler Fassadenlänge von 7m (rechts).*

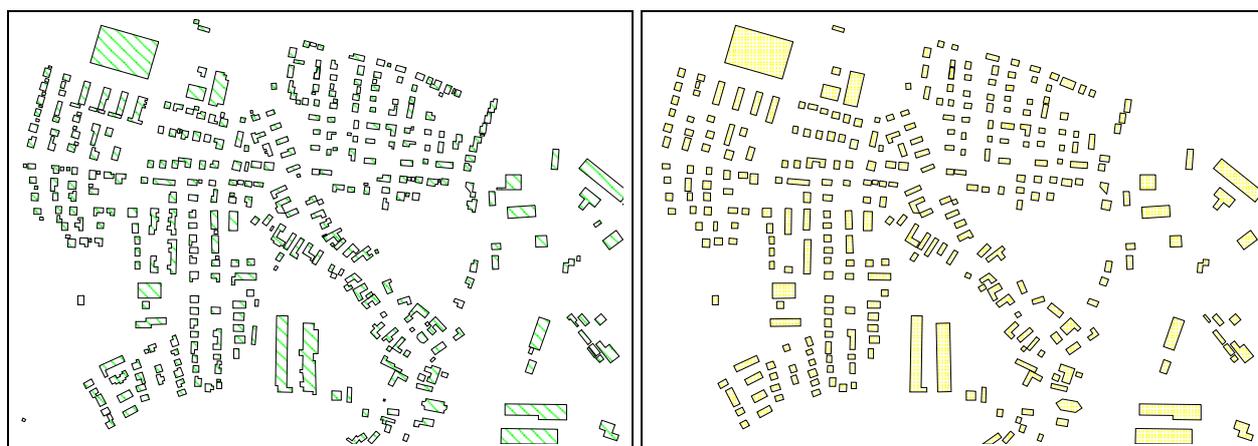


Abbildung 5.7: *Vimbuch – gesamte Ortschaft mit minimaler Fassadenlänge von 3m (links) bzw. 7m (rechts) vereinfacht.*

Das Ergebnis kann anhand des ermittelten mittleren Gewichtseinheitsfehlers σ_0 charakterisiert werden. Dieser drückt aus, wie gut die Anpassung des Modells an die aktuellen Gegebenheiten möglich war. In Abbildung 5.8 ist dies qualitativ anhand unterschiedlicher Farben dargestellt. Es wird deutlich, dass der Fehler geringer ist, wenn eine gute Übereinstimmung vorlag, und höher, wenn die Komplexität des Gebäudes deutlich reduziert wurde.

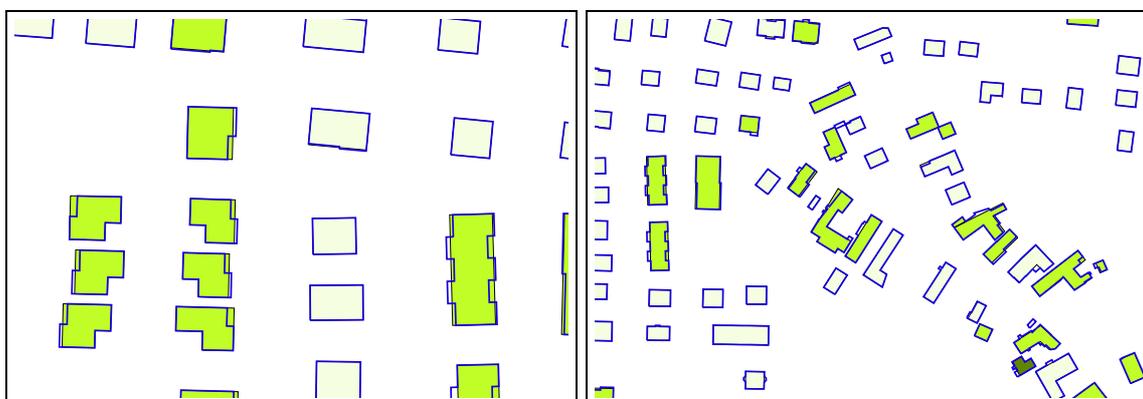


Abbildung 5.8: *Qualitative Darstellung des Wertes σ_0 in verschiedenen Farben, überlagert der Originalsituation: je heller, desto bessere Anpassung war möglich.*

Die iterative Abarbeitung der zu kurzen Gebäudekanten hat den günstigen Effekt, dass stufenförmige Gebäude auch korrekt vereinfacht werden, indem vereinfachte Stufen generiert werden (vgl. Abbildung 5.9).

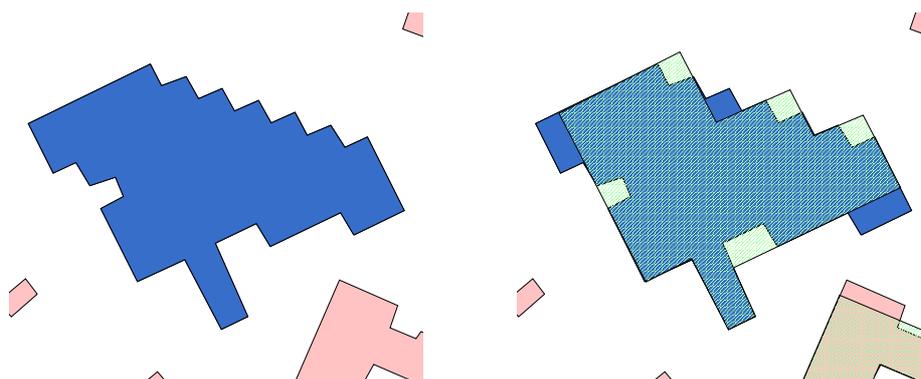


Abbildung 5.9: Anwendung der sukzessiven Elimination kurzer Kanten: Situation vor (links) und nach der Vereinfachung (rechts, schattierte Fläche).

Dies ist jedoch nur für den Fall möglich, dass die Stufen auf einer Gebäudeseite nicht in Reichweite von möglichen Stufen auf einer anderen Gebäudeseite kommen. Ansonsten beeinflussen diese sich gegenseitig.

5.1.5.2 Wirkung der Betonung

Folgende Beispiele verdeutlichen die Wirkung der Betonung. Abbildung 5.10b) zeigt, wie der lange Anbau aufgrund seiner geringen Breite wegfällt. Um dies zu umgehen, kann gefordert werden, dass Anbauten nicht wegfällen, wenn sie eine bestimmte Größe überschreiten. Den Effekt der Betonung zeigt Abbildung 5.10c). Deutlich wird, wie die ursprünglichen Gebäudeseiten verschoben werden, um diese Bedingung zu erfüllen. Abbildung 5.10d) zeigt eine Generalisierung mit minimaler Fassadenbreite von 20m.

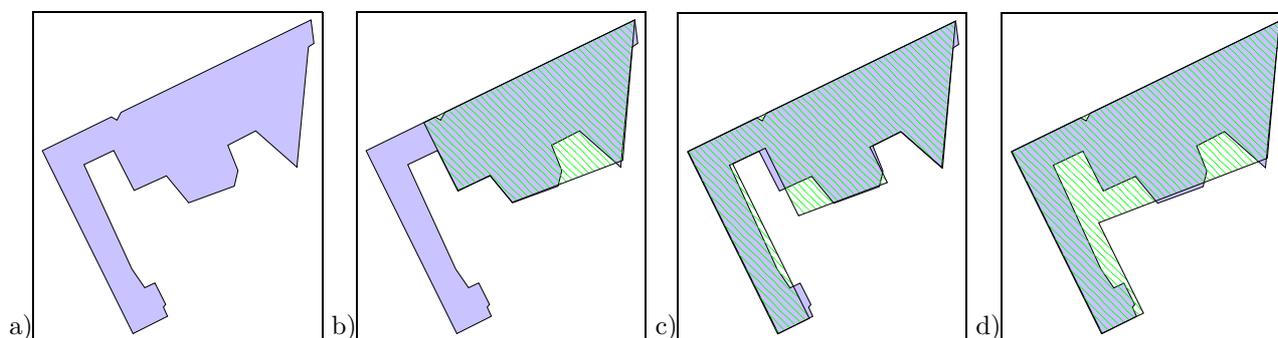


Abbildung 5.10: Wirkung der Betonung: Original (a), minimale Fassadenbreite: 15m, ohne Betonen (b), mit Betonen (c), minimale Fassadenbreite: 20m, mit Betonen (d); die generalisierte Form ist jeweils der Originalsituation überlagert.

5.1.5.3 Rektifizierung und Kollinearität

Wie oben beschrieben, kann über einen Steuerparameter festgelegt werden, ob genähert rechtwinklige Gebäudeecken exakt rechtwinklig gesetzt werden. Gleichzeitig werden kollineare Geraden zusammengefasst, indem Punkte, die genähert in der Geraden liegen, zusammengefasst werden. Den Effekt zeigt die Abbildung 5.11.

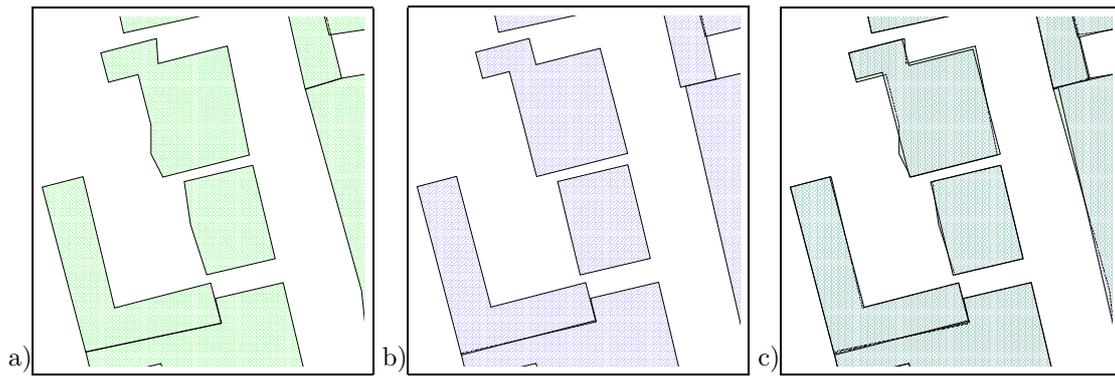


Abbildung 5.11: Wirkung des Rechtwinkelausgleichs und der Glättung: geringe Rektifizierung (a), starke Rektifizierung (b), Überlagerung beider Darstellungen (c).

5.1.5.4 Dichte Bebauung – Generalisierung von Innenstadtgebieten

Der Ansatz vereinfacht individuelle Gebäude nacheinander. Bei dicht benachbarten, bzw. adjazenten Gebäuden kann dies dazu führen, dass sich die generalisierten Grundrisse überlappen. Dies gilt besonders für dichte Bebauung (siehe Abbildung 5.12 mit einem Ausschnitt der Heidelberger Altstadt).

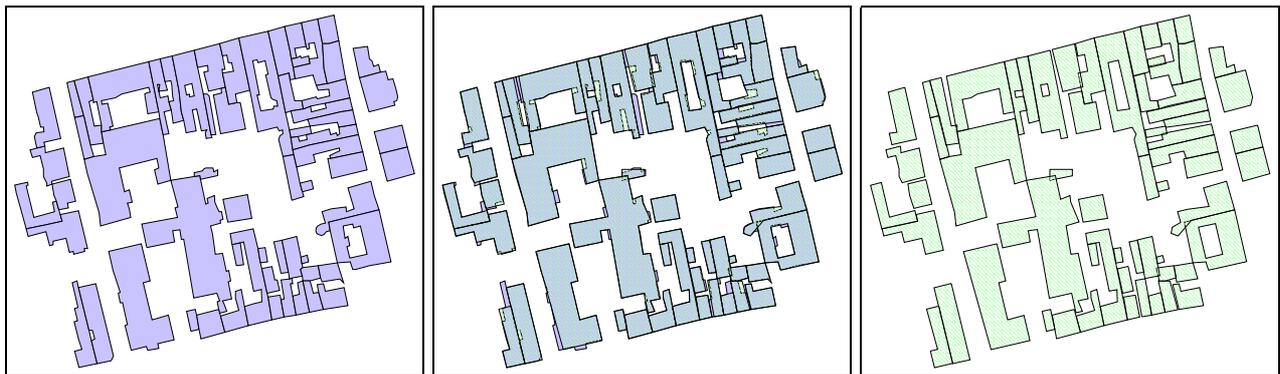


Abbildung 5.12: Dicht bebautes Altstadtgebiet: Originalsituation (links), Generalisierung (Mitte), Überlagerung beider Darstellungen (rechts).

Um diese Überlappungen zu vermeiden, sollten benachbarte Objekte eigentlich gemeinsam vereinfacht werden. Dies kann dadurch erreicht werden, dass die Objekte zunächst zusammengefasst, und anschließend vereinfacht werden (vgl. auch [Powitz 1992]). Die Zusammenfassung kann durch morphologische Operatoren erfolgen, indem die Objekte zunächst vergrößert (Dilatation) und anschließend wieder verkleinert (Erosion) werden. Dies wurde durch eine Sequenz von Puffer-Operationen innerhalb des GIS-Produkts ArcView realisiert.

Folgendes Beispiel zeigt einen Ausschnitt aus dem Innenstadtgebiet von Stuttgart³. Für einen Maßstabsübergang von der digitalen Stadtgrundkarte nach 1:25.000 wird als minimale Fassadenlänge 0,3 mm, d.h. 7,5 m angesetzt. Die Aggregation nutzt ebenfalls diesen Wert, um Lücken zwischen eng benachbarten Objekten zu schließen. Nachdem die Gebäude so zu größeren Einheiten zusammengefasst wurden, wird deren Form vereinfacht. Das Ergebnis von Aggregation und Vereinfachung ist in Abbildung 5.13, rechts, gezeigt.

³Die Grundrisse stammen aus der Digitalen Stadtgrundkarte des Stadtmessungsamtes Stuttgart.

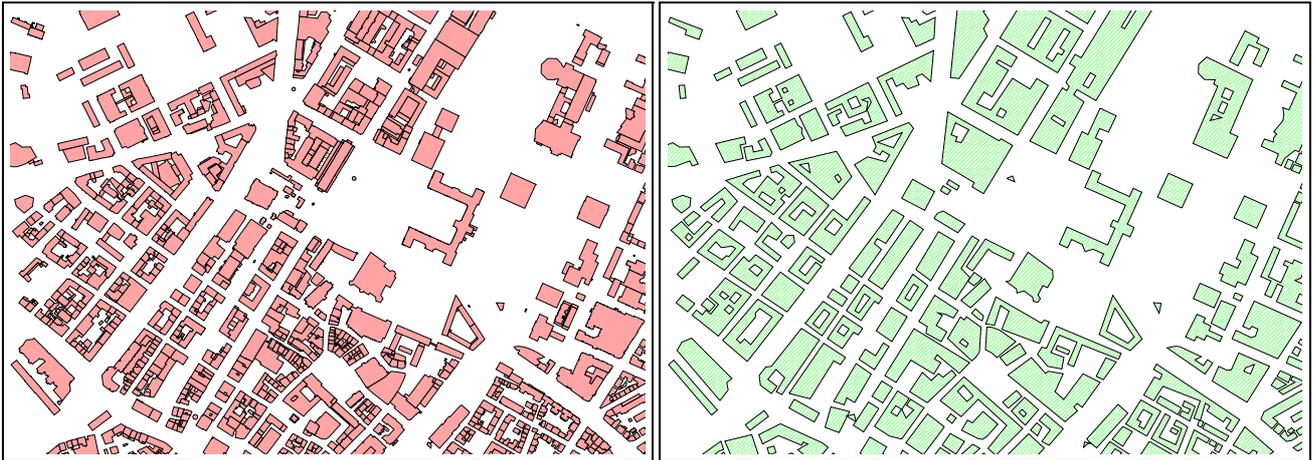


Abbildung 5.13: Anwendung von Aggregation und Vereinfachung auf einen dichten Gebäudebestand. Links: Ausgangssituation; rechts: Ergebnis nach Zusammenfassung und Vereinfachung.

5.1.6 Bewertung

Das Programm erlaubt die automatische Vereinfachung von Gebäudegrundrissen. Das beschriebene Verfahren arbeitet zweistufig, indem es zunächst eine Näherungslösung generiert, welche primär die Struktur des Grundrisses wiedergibt. Diese wird im zweiten Schritt mittels eines Optimierungsverfahrens an die ursprüngliche Gestalt angepasst.

Das Verfahren weist folgende Vorzüge auf:

- ▷ Das Verfahren passt einen vereinfachten Grundriss optimal an die ursprüngliche Gestalt an. Optimal bedeutet hier, dass die Abweichungen der generalisierten von den ursprünglichen Fassadenseiten minimiert werden.
- ▷ Die für den zweiten Schritt benötigte Näherungslösung muss nicht exakt sein, daher kann sie aus relativ einfachen Regeln abgeleitet werden.
- ▷ Im Verfahren wird implizit ein Rechtwinkelausgleich und eine Begradigung der Gebäudeseiten erzeugt.
- ▷ Einziger Steuerparameter ist die minimale Fassadenlänge, die in dem jeweiligen Maßstab noch wahrgenommen werden kann.
- ▷ Der mittlere Gewichtseinheitsfehler nach der Ausgleichung liefert ein Bewertungsmaß, mit dem die Qualität des Ergebnisses evaluiert werden kann.

Mit dem vorliegenden Ansatz lassen sich Objekte generalisieren, welche eine weitestgehend rechtwinklige Struktur besitzen. Probleme können dann auftreten, wenn diese Voraussetzung nicht gegeben ist. Dies ist z.B. der Fall, wenn aufeinanderfolgende Kanten nicht (nahezu) rechtwinklig sind. Um diese Situationen dennoch bearbeiten zu können, wurden weitere Regeln formuliert, welche kollineare Geraden zusammenfassen.

Je nach Datenbestand (lockere Bebauung – dichte innenstädtische Bebauung) werden unterschiedliche Strategien angewandt. Im ersten Fall werden die Gebäude separat vereinfacht. Die separate Behandlung der Gebäude birgt potentielle Probleme: zum einen können sich benachbarte Gebäude nach der Generalisierung überlappen, zum anderen kann durch die separate Bearbeitung nicht beeinflusst werden, dass benachbarte Gebäuden eventuell gleichartig vereinfacht werden sollen. Dies gilt insbesondere für dicht benachbarte Objekte und für Innenhöfe, welche auch separat bearbeitet werden: Dadurch ist es möglich, dass ein Innenhof nach der Generalisierung über die Grenzen des Gebäudes selbst herausragt.

Liegt eine dichte Bebauung vor, bei der einzelne Gebäude als solches nicht mehr wahrnehmbar sind, so sind die Gebäude zunächst zusammenzufassen und anschließend zu vereinfachen. Dieses Vorgehen ist sinnvoll, wenn

es darum geht, einen Maßstabsübergang für die visuelle Präsentation zu ermöglichen. Hier wird angenommen, dass das individuelle Gebäude nach der Generalisierung keine Bedeutung hat, sondern in einem Baublock aufgegangen ist. Es lassen sich jedoch auch Anwendungen vorstellen, bei welchen der Objektbezug erhalten bleiben muss. Für die Repräsentation in einem GIS kann es nötig sein, das Objekt mit seinen zugehörigen Attributen zu erhalten – und lediglich die Geometrie zu vereinfachen. Gleiches gilt, wenn die Gebäudegrundrisse als Vorinformation für die Bildanalyse genutzt werden sollen: entsprechend der Auflösung des Bildes wird hierfür zunächst eine Generalisierung erzeugt. Der Grad der Vereinfachung bestimmt sich aus der Auflösung des Bildes: die Vereinfachung sollte so stark sein, wie die gerade noch wahrnehmbaren Formen des Gebäudes im Bild. Auf diese Weise wird ein optimales Modell geschaffen, welches direkt mit den Bilddaten zusammengeführt werden kann. Auch in diesem Fall ist der Bezug zum ursprünglichen Gebäude wiederherzustellen. Hierfür muss das generalisierte Gesamtgebäude nach der Vereinfachung in seine ursprünglichen Bestandteile unterteilt werden.

Der Ansatz basiert auf der Analyse kurzer Gebäudeseiten. Es können jedoch auch Minimumsbedingungen auftreten, die sich nicht in Gebäudeseiten ausdrücken: ein H-förmiges Gebäude kann eine zu enge Stelle im Mittelteil des Gebäudes aufweisen. Um solche Fälle behandeln zu können, müssten zusätzlich auch innere Abstände künstlich in das Verfahren mit aufgenommen werden. Dies kann beispielsweise durch eine Triangulation des Gebäudes erreicht werden.

Die schon angesprochene Rechtwinkelanpassung wird implizit durch die Transformation des Gebäudes in seine zwei Hauptachsen erreicht. Wenn ein Gebäude jedoch mehr als zwei Hauptachsen hat, so kann diese Rechtwinkligkeit nicht mehr garantiert werden. Andererseits kann dann oft auch nicht mehr von einem rechtwinkligen Gebäude gesprochen werden.

Das Verfahren der Ausgleichung erlaubt es prinzipiell, noch weitere Beobachtungen in den Prozess mit aufzunehmen und zu optimieren. Dies könnte beispielsweise die Forderung sein, dass der Flächeninhalt des Gebäudes erhalten bleiben soll. Solche Bedingungen lassen sich leicht einführen.

5.2 Verdrängung durch vermittelnde Ausgleichung – das Programm PUSH

Die Verdrängung kann als Optimierungsproblem angesehen werden, bei welchem es gilt, äußere und innere Zwänge einer Situation optimal aufzulösen. Die Objekte sollen ihre Form ('innere Zwänge') beibehalten, die Abstände zwischen ihnen ('äußere Zwänge') sollen modifiziert werden.

In diesem Ansatz werden geometrische Bedingungen über die vermittelnde Ausgleichung formuliert. Die Objekte sind als Punkte, Linien oder Flächen beschrieben, wobei das Grundelement der Punkt ist, der über seine beiden ebenen Koordinaten bestimmt ist.

Im Ausgleichungsprozess werden die Koordinaten der Objekte als Unbekannte angesehen, Beobachtungen sind die geometrischen Zwänge, und zwar:

1. innere Zwänge:
 - ▷ Objektseiten
 - ▷ Objektwinkel
 - ▷ Richtungswinkel der Objekte
2. äußere Zwänge: Abstände zwischen Objekten
3. zusätzliche Bedingungen: Koordinaten als fiktive Beobachtungen.

Diese Beobachtungen gelten für die Objekte und ihre Beziehungen (Abstände). Sie beschreiben rein die Objekte und ihre Zusammenhänge und führen somit nicht unmittelbar zu einer Änderung der unbekanntenen Koordinaten. Würden daher lediglich die Näherungswerte als Beobachtungen eingeführt, so ergäben sich diese auch wieder als Lösung. Ein Zwang auf das System wird erst dadurch ausgeübt, dass Sollbeobachtungen eingeführt werden. Um diese Zwänge aufzulösen, müssen die Objekte verschoben, und damit die Objektkoordinaten neu berechnet werden.

Durch Angabe von Genauigkeiten bzw. Gewichten kann der Einfluss einer Beobachtung auf das Ergebnis gesteuert werden. So kann angegeben werden, ob Objekte sich deformieren dürfen, oder steif bleiben sollen, ob sie sich verdrehen dürfen, oder ihre Orientierung behalten sollen, bzw. ob sie bezüglich ihrer räumlichen Lage fest bleiben oder verschiebbar sein sollen.

5.2.1 Ausgleichungsansatz

Gemäß dem Modell der vermittelnden Ausgleichung werden alle Beobachtungen als Funktion der Unbekannten dargestellt. Für alle Beobachtungen l_i gilt:

$$l_i = f_i(x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_n, y_n)$$

Ist diese Beziehung nicht linear, so muss linearisiert werden. Dies wird durch eine Taylor-Reihenentwicklung am Näherungswert x_0 erreicht, welche nach dem ersten Glied abgebrochen wird.

$$\begin{aligned} l_i &= f_i(x_0) + \frac{\partial f_i}{\partial x_1} \Big|_0 \Delta x_1 + \frac{\partial f_i}{\partial y_1} \Big|_0 \Delta y_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial y_n} \Big|_0 \Delta y_n \\ l_i &= f_i(x_0) + a_{1i} \Delta x_1 + a_{2i} \Delta y_1 + a_{3i} \Delta x_2 + a_{4i} \Delta y_2 + \dots + a_{2ni} \Delta y_n \end{aligned}$$

Die partiellen Ableitungen bilden dabei die Elemente der Jacobimatrix A . Die Lösung \hat{x} , d.h. die Zuschläge zu den Näherungswerten der Unbekannten, ergibt sich mit $F = l - l_0$ aus der Beziehung:

$$\hat{x} = (A^T P A)^{-1} A^T P F$$

Die Beobachtungen l werden entweder aus den Näherungskoordinaten ermittelt – und damit den Näherungsbeobachtungen l_0 gleichgesetzt, oder sie werden als Zwangswerte eingeführt. Letzteres gilt speziell für die äußeren Zwänge, die Abstände.

Die endgültige Lösung ergibt sich aus der Addition zur Näherungslösung: $x_0 + \hat{x}$.

5.2.2 Dimensionierung

Das Gleichungssystem besteht aus n Unbekannten und m Beobachtungen.

Die Anzahl der Unbekannten ist gleich der Anzahl der Punkte:

$$n = 2 * \text{Anzahl Punkte}$$

Als Beobachtungen gelten zunächst die Objektseiten, ihre Innenwinkel, ein Richtungswinkel pro Objekt, sowie die Abstände zwischen allen Objekten. Schließlich werden noch die Koordinaten als fiktive Beobachtungen eingeführt. Damit ergibt sich folgende Situation:

$$\begin{aligned} m &= \text{Anzahl Objektlinien} + \text{Anzahl Objektinnenwinkel} + \\ &\quad + \text{Anzahl Objektrichtungswinkel} + \\ &\quad + \text{Anzahl der Dreieckslinien, die zu Objekten gehören} + \\ &\quad + 2 * \text{Anzahl Punkte} \end{aligned}$$

5.2.3 Aufstellen der Beobachtungsgleichungen

Die Beobachtungsgleichungen für die einzelnen Beobachtungen werden im Folgenden aufgeschlüsselt. Zusätzlich wird das stochastische Modell, d.h. die entsprechende Genauigkeitssituation beschrieben. Abbildung 5.14 zeigt die in den Formeln verwendeten Objektbezeichnungen.



Abbildung 5.14: Innere Geometrie eines Objektes (a); äußerer Zwang: Abstand zwischen zwei Objekten 1 und 2 (b).

5.2.3.1 Funktionales und stochastisches Modell – Objektseiten

Die Objektseite s_{12} ergibt sich über die euklidische Distanz aus den Koordinaten ihrer Endpunkte $p_1(x_1, y_1)$ und $p_2(x_2, y_2)$.

$$\begin{aligned}
 s_{12} &= \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \\
 dx &= x_2 - x_1 \\
 dy &= y_2 - y_1 \\
 \frac{\partial s_{12}}{\partial x_1} &= -1/s_{12} * dx \\
 \frac{\partial s_{12}}{\partial y_1} &= -1/s_{12} * dy \\
 \frac{\partial s_{12}}{\partial x_2} &= 1/s_{12} * dx \\
 \frac{\partial s_{12}}{\partial y_2} &= 1/s_{12} * dy
 \end{aligned}$$

Als Beobachtung wird die Objektseite selbst angesetzt, d.h. Sollwert und Näherungswert sind gleich, damit entsteht durch diese Beobachtung kein zusätzlicher Zwang auf das Netz. Ein solcher kann ausgeübt werden, wenn eine Größenänderung des Objekts erzwungen werden soll. Dies entspricht einer Betonung des Objektes (vgl. Kapitel 5.3.1).

Das Gewicht spezifiziert, ob ein Objekt als deformierbar angesehen wird, oder ob es steif bleiben muss, und wird entsprechend gering oder hoch angesetzt.

5.2.3.2 Funktionales und stochastisches Modell – Objektorientierung

Die Objektorientierung ergibt sich aus dem Richtungswinkel einer Objektseite.

$$\begin{aligned}
 \phi_{12} &= \arctan \left[\frac{dx}{dy} \right] \\
 dx &= x_2 - x_1 \\
 dy &= y_2 - y_1 \\
 s_{12} &= \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \\
 \frac{\partial \phi_{12}}{\partial x_1} &= -dy/s_{12}^2 \\
 \frac{\partial \phi_{12}}{\partial y_1} &= dx/s_{12}^2 \\
 \frac{\partial \phi_{12}}{\partial x_2} &= dy/s_{12}^2 \\
 \frac{\partial \phi_{12}}{\partial y_2} &= -dx/s_{12}^2
 \end{aligned}$$

Das Gewicht der Beobachtung ϕ_{12} ist hoch, falls das Objekt sich nicht verdrehen soll – was der Regelfall ist. Als Wert der Beobachtung wird der Richtungswinkel selbst angesetzt.

5.2.3.3 Funktionales und stochastisches Modell – Objektinnenwinkel

Die Innenwinkel des Objektes ergeben sich aus der Differenz der Richtungswinkel eines Eckpunkts.

$$\begin{aligned}
 \alpha &= \phi_{previous} - \phi_{next} = \phi_{13} - \phi_{12} \\
 dxp &= x_3 - x_1 \\
 dyp &= y_3 - y_1 \\
 dxn &= x_2 - x_1 \\
 dyn &= y_2 - y_1 \\
 s_{12} &= \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \\
 s_{13} &= \sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2} \\
 \frac{\partial \alpha}{\partial x_1} &= -dyp/s_{12}^2 + dyn/s_{13}^2 \\
 \frac{\partial \alpha}{\partial y_1} &= dxp/s_{12}^2 - dxn/s_{13}^2 \\
 \frac{\partial \alpha}{\partial x_2} &= dyp/s_{12}^2 \\
 \frac{\partial \alpha}{\partial y_2} &= -dyp/s_{12}^2 \\
 \frac{\partial \alpha}{\partial x_3} &= -dyn/s_{13}^2 \\
 \frac{\partial \alpha}{\partial y_3} &= dxn/s_{13}^2
 \end{aligned}$$

Als Beobachtung gilt hier der Winkel selbst. Durch diese Beobachtung entsteht – ebenso wie durch die Orientierung – kein unmittelbarer Zwang auf die Situation.

Auch hier bestimmt das Gewicht die Steifigkeit des Objekts: ein hohes Gewicht wird gegeben, wenn das Objekt als steif deklariert wird, ein geringes, falls es sich verformen darf.

5.2.3.4 Funktionales und stochastisches Modell – Abstände

Die Nachbarschaft zwischen den Objekten wird zunächst über eine Delaunay-Triangulation bestimmt. Durch diese Vernetzung aller Objekte kann direkt abgelesen werden, welche Objekte benachbart sind, da diese ein gemeinsames Dreieck teilen. Die Abstände $dist$ errechnen sich über die Höhe im Dreieck.

Die Objektseite wird als Verbindung der Punkte 1 und 2 angesehen, der dritte Punkt, zu dem die Höhe bestimmt wird, ist der Punkt 0.

$$\begin{aligned}
 dist &= \frac{1}{s_{12}} * [(x_0 - x_1)(y_2 - y_1) - (y_0 - y_1)(x_2 - x_1)] \\
 dx &= x_2 - x_1 \\
 dy &= y_2 - y_1 \\
 \frac{\partial dist}{\partial x_0} &= 1/s_{12} * dy \\
 \frac{\partial dist}{\partial y_0} &= -1/s_{12} * dx \\
 \frac{\partial dist}{\partial x_1} &= \frac{1}{s_{12}^2} [s_{12} * ((y_0 - y_1) - dy) + dist * dx]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial dist}{\partial y_1} &= \frac{1}{s_{12}^2} [s_{12} * (dx - (x_0 - x_1)) + dist * dy] \\ \frac{\partial dist}{\partial x_2} &= \frac{1}{s_{12}^2} [s_{12} * (y_1 - y_0) - dist * dx] \\ \frac{\partial dist}{\partial y_2} &= \frac{1}{s_{12}^2} [s_{12} * (x_0 - x_1) - dist * dy]\end{aligned}$$

Der Abstand muss einen bestimmten Betrag einhalten, die vorgegebene minimale Distanz min_dist . Eine Möglichkeit der Aggregation von Objekten kann hier erreicht werden, indem der Abstand auf Null gesetzt wird. Dies wird durch einen weiteren Wert, die sogenannte *kritische Distanz*, gesteuert. Objekte, deren Abstand unter diese kritische Distanz fällt, werden aufeinander zu bewegt.

Abhängig von den aktuellen Distanzen, die aus den Näherungswerten berechnet wurden, werden als Soll-Beobachtung folgende Werte eingesetzt:

Aktuelle Distanz ist kleiner als die kritische Distanz: Soll-Beobachtung wird auf 0 gesetzt. Das Gewicht ist hier hoch, da diese Distanz eingehalten werden soll.

Aktuelle Distanz ist kleiner als die vorgegebene Minimaldistanz: Soll-Beobachtung wird auf die Minimaldistanz gesetzt. Diese Beobachtung wird ebenfalls mit einem hohen Gewicht belegt.

Aktuelle Distanz ist größer als die Minimaldistanz: Diese Distanz bleibt erhalten, indem die Soll-Beobachtung gleich der Näherungsdistanz gesetzt wird. Sie darf sich in gewissem Rahmen verändern, nämlich bis zum vorgegebenen minimalen Abstand. Daher wird das Gewicht als Funktion der Differenz des Abstands zum Soll-Abstand formuliert:

$$\begin{aligned}P_{dist} &= \frac{1}{(abs(dist) - min_dist)^2} \\ \sigma_{dist} &= \pm(abs(dist) - min_dist)\end{aligned}$$

Für die Abstandsberechnung müssen drei Fälle unterschieden werden:

1. das Nachbarobjekt liegt im direkten Einflussbereich (Fall a),
2. das Nachbarobjekt liegt außerhalb des Einflussbereichs, obwohl es durch eine Dreieckskante verbunden ist (Fall b),
3. die kürzeste Verbindung zum Nachbarobjekt ist über eine Dreieckskante – und nicht über die Höhe im Dreieck (Fall c). In diesem Fall ist als Abstand die Dreieckskante einzusetzen, und nicht wie sonst die Höhe im Dreieck. Als Funktion wird hier die Euklidische Distanz gewählt.

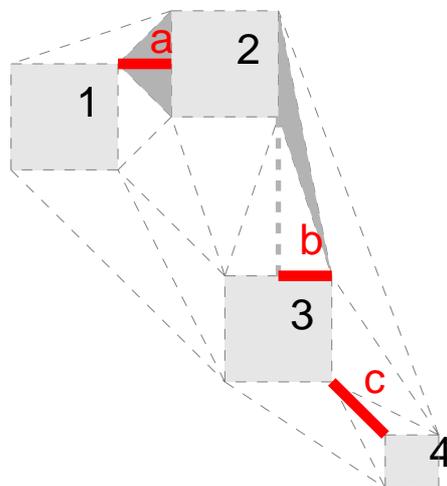


Abbildung 5.15: *Verschiedene Nachbarschaftssituationen von Objekten.*

Diese Fälle sind in Abbildung 5.15 visualisiert: eine Verdrängungssituation tritt nur in Fällen **a** und **c** auf, d.h. Objektpaare 1-2 und 3-4 müssen jeweils gegeneinander verdrängt werden; Objektpaar 2-3 muss dagegen nicht bezüglich des Abstands **b** verschoben werden.

Auf diese Weise wird für jede Objektseite, die mit einem Punkt eines weiteren Objekts verbunden ist, eine Beobachtungsgleichung aufgestellt.

5.2.3.5 Funktionales und stochastisches Modell – zusätzliche Beobachtungen, die Koordinatenunbekannten

Die Koordinatenunbekannten werden als zusätzliche Beobachtungen eingeführt. Hiermit ist es möglich, deren Genauigkeit vorab zu modellieren und anschließend auch zu testen. Damit kann gesteuert werden, welche Objekte als fix und welche als beweglich angesehen werden. Auf diese Weise wird die Verdrängungspriorität unterschiedlicher Objekte modelliert.

Die Punkte werden standardmäßig mit geringem Gewicht angesetzt, d.h. sie sind relativ verschiebbar – werden Punkte hingegen als fest vorgegeben, so ist ihr Gewicht hoch.

5.2.4 Iterative Lösung und Qualitätsmerkmale

In einer iterativen Lösung werden die Unbekannten bestimmt. Die Ergebnisse einer Iteration ergeben neue Werte für die Bedingungsgleichungen – hier können etwa neue Beschränkungen hinzukommen, weil sich ein Objekt verschoben hat. Die Iteration wird so lange durchgeführt, bis die Zuschläge zu den Unbekannten kleiner als ein Schwellwert bleiben (bzw. bis eine maximale Zahl an Iterationen berechnet worden ist).

Die Qualität des Ergebnisses kann anhand von Maßzahlen beurteilt werden. Diese Maße ergeben sich durch den Vergleich der Situation *vor* mit der *nach* der Verdrängung:

- ▷ Deformation der Objekte: Veränderung der Objektseiten oder Objektinnenwinkel,
- ▷ Verdrehung der Objekte: Veränderung des Richtungswinkels,
- ▷ Grad der Verschiebung der Objekte: maximale Verschiebung einer Koordinate des Objektes.

Diese Maße lassen sich beispielsweise visuell darstellen und geben damit unmittelbar einen Hinweis auf mögliche Problemstellen. Große Deformationen treten beispielweise auf, wenn Objekte aufgrund äußerer Zwänge zu wenig Freiräume haben und daher zusammengedrückt werden. Diese Maße können als Auslöser für die Interaktion eines Operators genutzt werden, für die es mehrere Optionen gibt:

- ▷ er gibt sich mit der Situation zufrieden,
- ▷ er lockert die Zwänge, indem Objekte als verschiebbar charakterisiert werden,
- ▷ oder er schafft Platz, indem Objekte eliminiert werden.

5.2.5 Parametrisierung

Die Parametrisierung kann entsprechend der vorhandenen Objektklassen erfolgen: z.B. kann angegeben werden, dass Straßen generell als fix, d.h. unbeweglich anzusehen sind, während Gebäude als verschiebbar gelten. Entsprechend dieser Vorgaben werden die Gewichte, die zu den jeweiligen Koordinaten der Objekte gehören, hoch oder gering angesetzt. Gleiches gilt für die innere Struktur der Objekte, welche als steif oder verformbar charakterisiert werden kann.

Andererseits kann diese Zuweisung auch objektspezifisch durchgeführt werden, indem einzelne Objekte fixiert bzw. als variabel gekennzeichnet werden.

5.2.5.1 Beispiele zur Darstellung der Wirkung der einzelnen Parameter

Anhand folgender Beispiele soll die Wirkungsweise der Parameter verdeutlicht werden. Eine Straße ist umgeben von je zwei Gebäuden auf jeder Seite. Auf der linken Seite stehen die Gebäude 1 und 2 recht dicht an der Straße (2m), während die beiden Gebäude rechts der Straße in einer Entfernung von 10 (Gebäude 3) bzw. 20m (Gebäude 4) stehen. Die Seitenlänge eines Gebäude-Quadrats ist hierbei 10m. In Abbildung 5.16,a) ist diese Ausgangssituation dargestellt, zusammen mit der Dreiecksvermaschung, auf deren Basis die Nachbarschaften ermittelt werden. Mit dieser Objektkonstellation wurden verschiedenen Fälle berechnet, deren Charakteristika in Tabelle 5.1 wiedergegeben sind.

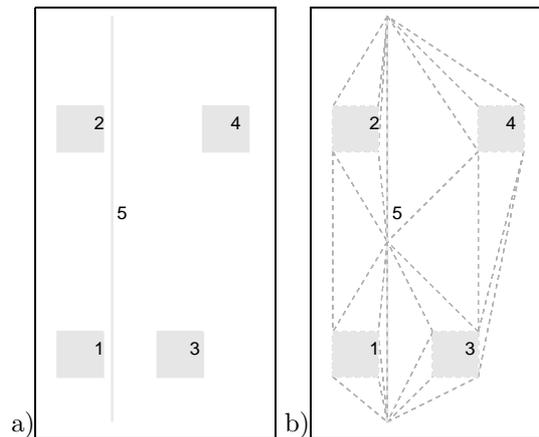


Abbildung 5.16: Darstellung der Ausgangssituation (a), sowie der Triangulierung dieser Situation (b).

Der erste Fall (Fall 1) wurde mit folgenden Parametern berechnet und ist in Abbildung 5.17a) dargestellt:

- ▷ minimale Distanz: 11m,
- ▷ kritische Distanz: 0m,
- ▷ Straße wird festgehalten,
- ▷ Objekte sind nicht verformbar.

Die Gebäude werden jeweils von der Straße weg verschoben, die Straße selbst bleibt an ihrer Stelle. In Tabelle 5.1 sind je zwei Qualitätsparameter für die Objekte angegeben: die maximale Deformation einer Objektseite (def) und die maximale Verschiebung des Objektes (ver). Betrachtet man die Deformationsparameter für den Fall 1, so sieht man, dass sich die Gebäudeseiten leicht verformt haben (Objekt 1 und 2: Größenordnung 9cm, was bezogen auf eine Gebäudeseite von 10m vernachlässigbar ist). Die Verschiebungsparameter zeigen an, dass die Objekte 1 und 2 stark verschoben wurden ($\approx 9\text{m}$), Objekt 3 um 1.23m nach rechts gerückt wurde, während die Straße (Objekt 5) – wie vorgegeben – relativ fix blieb und visuell nicht merklich um 0.26m verschoben wurde. Ebenso blieb Objekt 4 von der Verdrängung unberührt.

In Fall 2 werden die Auswirkungen untersucht, die entstehen, wenn ein Verformen der Objekte erlaubt wird – während die Straße weiter festgehalten wird. Es schlägt sich das in den Deformationswerten nieder: Die Objekte 1 und 2 werden um 0.8 m gestaucht, während diese Werte vorher fast eine Größenordnung kleiner waren (0.09m).

Gibt man die Straße jetzt frei (Fall 3), d.h. erlaubt ihr Verschieben, so ergibt sich Abbildung 5.17b): offensichtlich wird sie jetzt in die Mitte zwischen die Gebäudereihen bewegt. Dies zeigen auch die Verschiebungsparameter in Tabelle 5.1: Objekte 1 und 2 werden jetzt nur noch um rund 4.8m verschoben, während die Straße (Objekt 5) ebenfalls bewegt wird (um 4.4m nach rechts). Dies führt dazu, dass auch die Objekte rechts der Straße (3 und 4) entsprechend verschoben werden.

| Objekt | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Fall | def | ver |
| 1 | 0.09 | 9.08 | 0.09 | 8.96 | 0.01 | 1.23 | 0.00 | 0.06 | 0.00 | 0.26 |
| 2 | 0.82 | 9.08 | 0.81 | 8.97 | 0.11 | 1.22 | 0.01 | 0.06 | 0.00 | 0.25 |
| 3 | 0.05 | 4.96 | 0.04 | 4.70 | 0.05 | 5.35 | 0.01 | 1.07 | 0.00 | 4.41 |

Tabelle 5.1: Darstellung der Maße 'maximale Deformation' (*def*), sowie 'maximale Verschiebung' (*ver*) für die Verdrängung mit verschiedenen Parametern [in m].

Wird die kritische Distanz jetzt auf 5m hochgesetzt, so werden alle Objekte, deren Abstand kleiner als 5m ist, aufeinander zu bewegt. Das Ergebnis ist in Abbildung 5.17c) wiedergegeben: Objekte 1 und 2 rücken direkt an die Straße, während Objekt 3 auf die Minimaldistanz gesetzt wird. Objekt 4 befindet sich in genügend großem Abstand und erfährt daher keine Verschiebung.

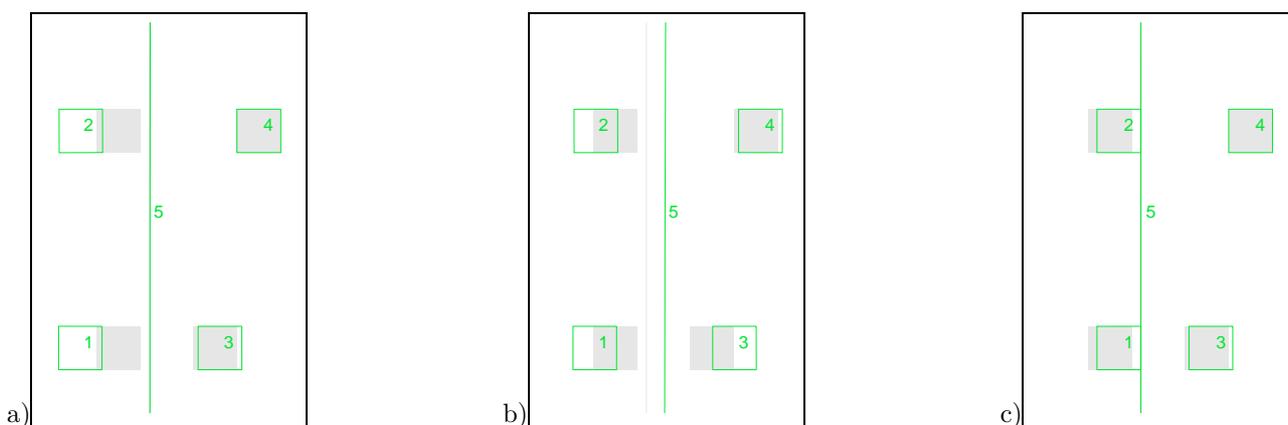


Abbildung 5.17: Verdrängung mit minimaler Distanz von 11 m: Straßen festgehalten (a), Straßen verschiebbar (b), Kritische Distanz wird auf 0 gesetzt (c). Die Originalsituation ist jeweils in grau und gefüllt dargestellt, während das Ergebnis der Verdrängung ungefüllt wiedergegeben ist.

Die Wirkung der Manipulation des Orientierungsparameters wird anhand folgender Abbildungen deutlich. Die Gebäude liegen zum einen außerhalb der kritischen Distanz und werden daher von der Straße weg bewegt, zum anderen liegen sie innerhalb und werden an die Straße platziert. Hält man die Orientierung fest, so wird das Gebäude lediglich von der Straße weg (5.18a)), bzw. auf die Straße zu bewegt (5.18b)). Gibt man die Orientierung frei, so erfolgt neben der Translation auch noch eine Rotation (5.18c) und d))

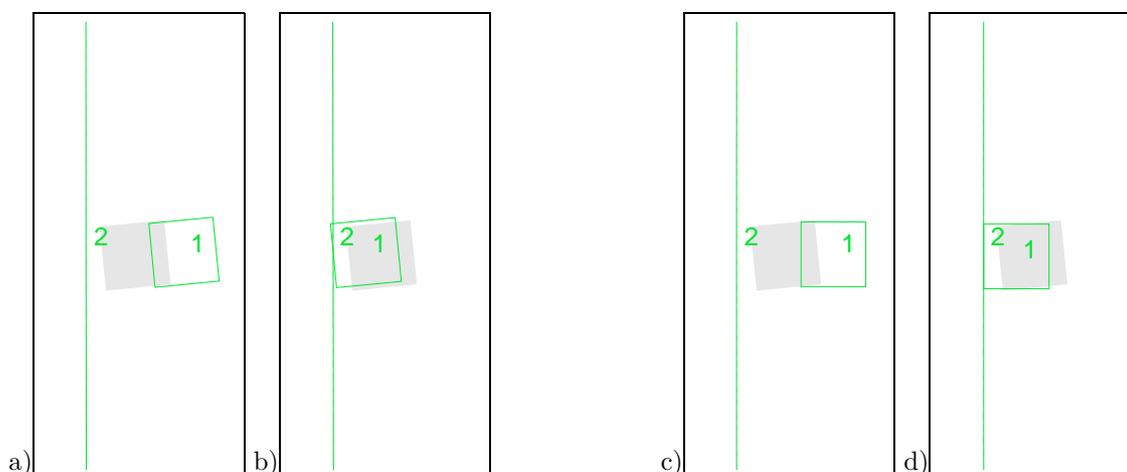


Abbildung 5.18: Wirkung des Orientierungsparameters: Orientierung fix (a,b), Orientierung frei (c,d).

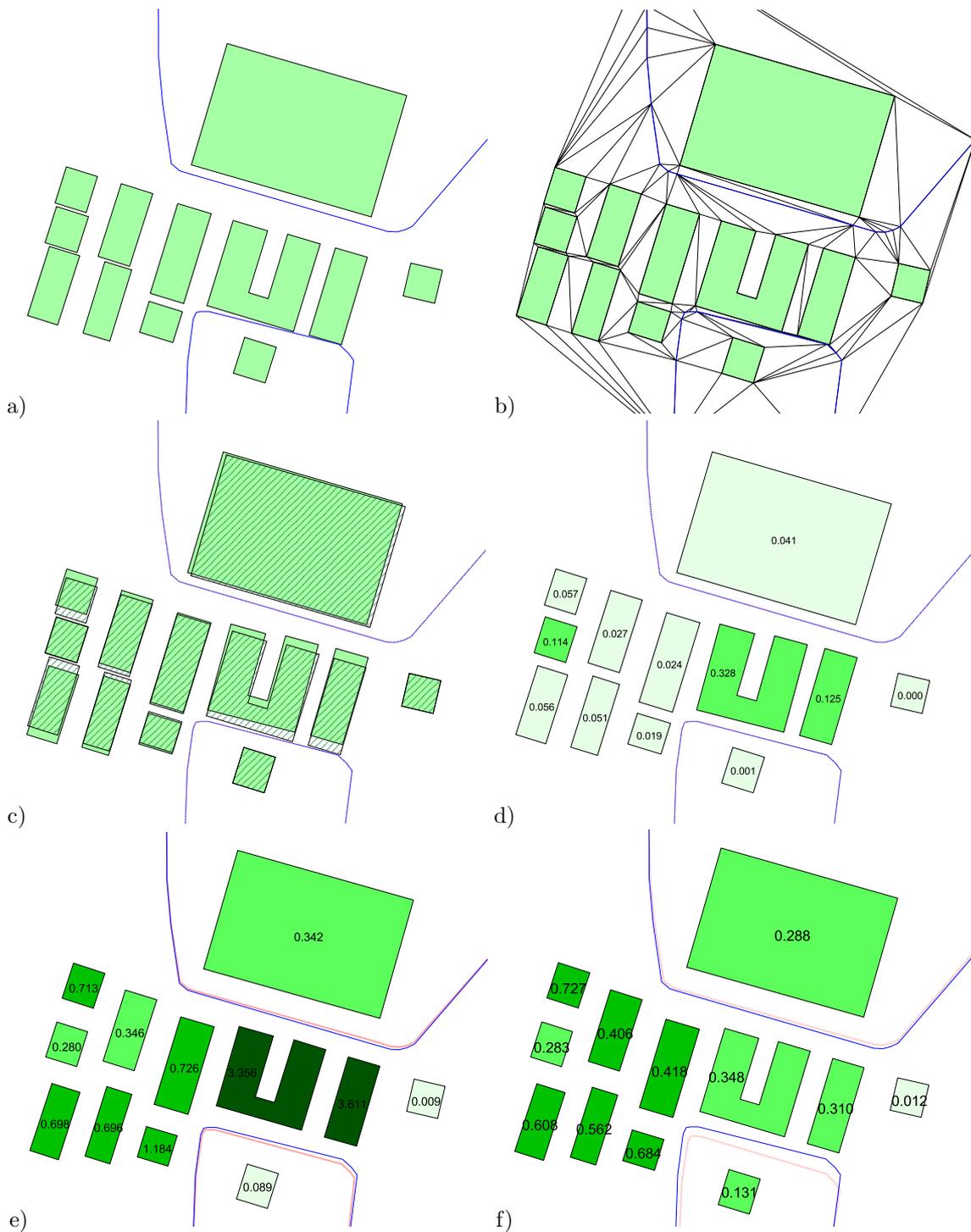


Abbildung 5.19: a) Originalsituation mit Gebäuden und Straßen, b) Triangulation, c) Verdrängung mit einer Minimaldistanz von 7m, Straßen werden als fix vorgegeben, d) Deformation der Gebäudeseiten, e) Deformation nach einer Verdrängung mit einer Minimaldistanz von 15m, Straßen sind fix, f) Verdrängung mit einer Minimaldistanz von 15m, Straßen dürfen sich bewegen.

5.2.6 Beispiele mit realen Daten

5.2.6.1 Ausschnitt aus einer Siedlung

Die Abbildung 5.19 verdeutlicht die Wirkungsweise des Ansatzes anhand von zwei Objektarten Straße und Gebäude. Zunächst werden die Straßen als fix angesehen, die Gebäude sind beweglich. Als Zwang wird eingeführt, dass alle Objekte eine Minimaldistanz von 7m einhalten sollen. Über eine Delaunay-Triangulation wird

die Nachbarschaft bestimmt (5.19b)). Das Ergebnis der Verdrängung stellt Abbildung 5.19c) dar, wobei die ursprüngliche Situation gestrichelt unterlegt ist. Es wird deutlich, wie die Objekte gegeneinander verschoben wurden, um die minimalen Abstände einzuhalten. Falls nicht genügend Freiraum für die Objekte vorliegt, können sie deformiert werden. In Abbildung 5.19d) verdeutlichen die unterschiedlichen Farben den Grad der Deformation, der die Gebäude durch die Verdrängung unterworfen wurden. Unter Deformation wird hier wiederum die maximale Veränderung einer Gebäudeseite verstanden. Es zeigt sich, dass die Deformationen vernachlässigbar sind, sind sie doch im Bereich von etwa 30cm (bezogen auf eine Gebäudeseite von 30m). Dies ändert sich jedoch, wenn die äußeren Zwänge zu stark sind: in einer weiteren Berechnung wurde eine Minimaldistanz von 15m vorgegeben. Dies führt zu starken Verformungen in den Gebäudeobjekten, welche zwischen den zwei Straßenzügen liegen. Es bewirkt sogar die Verschiebung der südlichen Straße – obwohl sie eigentlich als fix definiert wurde. Die starke Deformation der Gebäude (Maximalwert 3.4m), welche in Abbildung 5.19e) deutlich wird, ist ein Hinweis für eine Situation, wo die Zwänge zu stark sind.

Diese können dann als Auslöser für die Interaktion eines Operateurs genutzt werden. Prinzipiell geben die abgeleiteten Maße Hinweise darauf, wie gut die Zwänge durch die Bearbeitung ausgeglichen worden sind. Zur Auflösung dieser starken Deformationen werden im Beispiel die Straßen als verschiebbar charakterisiert, worauf sich die Situation in Abbildung 5.19f) ergibt: die untere Straße wird nach Süden verschoben, damit lösen sich die Deformationen weitestgehend auf.

Abbildung 5.20 zeigt den Effekt der Aggregation anhand eines realen Beispiels. Die kritische Distanz wurde hier auf 6m gesetzt. Dies bedeutet, dass Objekte, deren Abstand unterhalb dieses Werts liegt, aufeinander zu bewegt werden. In diesem Beispiel werden einige Gebäude an die Straße gerückt.

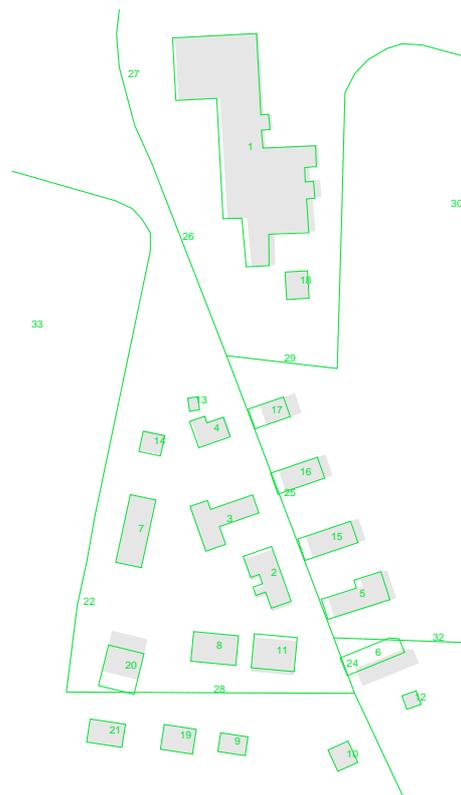


Abbildung 5.20: Kritischer Wert 6m, minimale Distanz 10m: Gebäude, deren Abstand kleiner ist als 6m werden an die Straße gerückt.

5.2.6.2 Ausschnitt aus Siedlung mit dichter Bebauung

In dichten Stadtgebieten erfolgt die Darstellung der Gebäude in kleineren Maßstäben üblicherweise in Form einer Blockdarstellung. Die Straßen müssen eine gewisse Mindestbreite aufweisen, was zu Konflikten führt. Abbildung 5.21 zeigt einen Ausschnitt des Stadtzentrums von Heidelberg. Links ist die Situation vor der Verdrängung

dargestellt, wo deutlich wird, dass die Straßen zu wenig Platz haben. Um diese in einer angemessenen Symbolik (Breite) darstellen zu können, muss sie verbreitert werden – was auf Kosten der Bebauung geht, und sich in den Deformationswerten widerspiegelt.



Abbildung 5.21: Verdrängungsbeispiel für dichte Innenstadtbauung: Ausgangssituation (links), Ergebnis nach der Verdrängung mit Deformationswerten in verschiedenen Farben (rechts).

Das Ergebnis der Verdrängung ist rechts dargestellt, wobei die maximalen Deformationen der Blöcke farblich kodiert sind. Insbesondere die Gebäudeblöcke im mittleren Bereich werden stark zusammengedrückt – um bis zu 6.2m. Insgesamt entsteht jedoch ein klareres Bild, welches genügend Freiraum für die Straßenobjekte bereitstellt.

5.2.6.3 Selbst-Verdrängung

Bei linienhaften Objekten kann es vorkommen, dass die Abstände *innerhalb* eines Objektes unter die Minimaldistanz fallen. Dies tritt beispielsweise bei mäandrierenden Flüssen bzw. Serpentinstraßen auf. Abbildung 5.22 visualisiert die Möglichkeit der Verdrängung innerhalb eines Objektes: der mäandrierende Fluss wird in sich und gegenüber der benachbarten Straße verdrängt. Die Ausgangssituation ist dabei gestrichelt dargestellt.

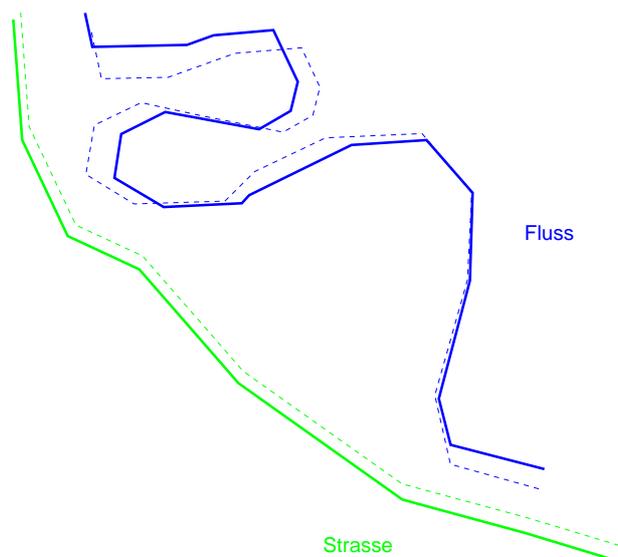


Abbildung 5.22: Verdrängung innerhalb eines Objektes: Fluss Schleifen verdrängen sich gegenseitig. Ausgangssituation gestrichelt, Ergebnis der Verdrängung durchgezogen.

5.2.6.4 Fluss – Straße – Eisenbahn

Eine typische Verdrängungssituation ist die konkurrierende Darstellung von Fluss, Straßen und Eisenbahnen. Die Symbolisierung erfordert eine Verdrängung der Objekte. Prinzipiell sollte die Talsohle mit dem Fluss lagerichtig wiedergegeben werden, und die Verkehrswege nach den Seiten verdrängt werden [Lichtner 1976]. Dies wurde in der folgenden Situation so modelliert, dass der Fluss als fest angenommen wurde, die Verkehrswege hingegen verschiebbar sind (Abbildung 5.23).

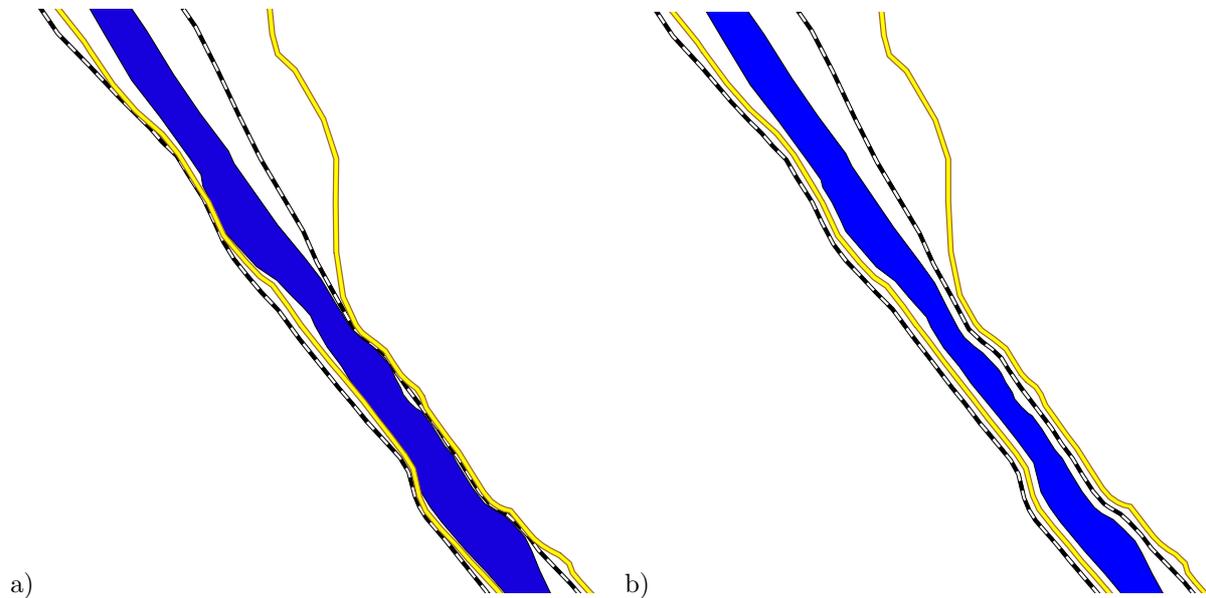


Abbildung 5.23: a) Originalsituation mit Fluss, Straßen und Bahnlinien auf jeder Seite vor der Verdrängung, b) Situation nach Verdrängung und Signaturierung.

In Abbildung 5.23 ist links die Ausgangssituation dargestellt, bei der sich die Symbolik der Objekte überlagert und zu Konflikten führt. Das Ergebnis zeigt, dass eine Verdrängung nur dort erfolgt, wo die Abstände zu gering sind, d.h. im Bereich der Konflikte in Flussnähe, während in größerer Entfernung vom Fluss die Originalgeometrie und Position der Objekte weitestgehend erhalten bleibt. Es wird deutlich, dass der Fluss durch die Verdrängung leicht deformiert wurde, seine charakteristische Form jedoch erhalten geblieben ist. Schließlich entsteht eine Darstellung, in der alle Konflikte beseitigt sind und welche genügend Raum für alle Objekte und ihre zugehörige Symbolik bereitstellt (Abbildung 5.23, rechts).

5.2.7 Bewertung

Der vorgestellte Ansatz erlaubt eine Lösung des Verdrängungsproblems bezüglich individueller Objekte: die Konflikte zwischen einzelnen Objekten werden beseitigt, d.h. nach der Generalisierung sind die Mindestabstände zwischen den Objekten eingehalten und gleichzeitig wird die ursprüngliche Struktur weitestgehend beibehalten. Ferner wird durch das Minimierungsprinzip gewährleistet, dass die Verschiebungsbeträge minimal sind.

Das Verfahren zeigt folgende Eigenschaften:

- ▷ Der Algorithmus führt dazu, dass alle räumlichen Konflikte auf einmal gelöst werden. Im Gegensatz zu lokal arbeitenden Verfahren werden hier keine Folgekonflikte erzeugt. Das Ergebnis ist, dass die Objekte deutlicher visuell trennbar sind.
- ▷ Die räumliche Struktur der Situation bleibt erhalten, insbesondere die räumlichen Beziehungen zwischen den Objekten. Dies wird erreicht, da die Nachbarschaftssituation der Objekte in einer topologischen Struktur gegeben ist und die Objekte sich möglichst wenig verschieben.

- ▷ Die Qualität des Ergebnisses kann anhand von Maßzahlen beurteilt werden. Diese Maße lassen sich beispielsweise visuell darstellen und geben damit unmittelbar Hinweise auf mögliche Problemstellen. Diese Darstellung ist z.B. in Form eines Ampelmodells möglich, wo mit den Farben grün-gelb-rot gute, akzeptable und kritische Situationen visualisiert werden. Sie können aber auch automatisch weiterverarbeitet werden. Diese Qualitätsbeurteilung und Selbstdiagnose des Verfahrens ist eine elementare Voraussetzung für die Automation von Operationen.
- ▷ Das Verfahren arbeitet mit punkt-, linien- und flächenhaften Objekten gleichermaßen.
- ▷ Das Verfahren arbeitet vollautomatisch.

Ein kritischer Faktor ist die Größe des Gleichungssystems, welche durch die Anzahl der Objektpunkte bestimmt wird. Die Bearbeitung größerer Gebiete führt schnell zu sehr großen Gleichungssystemen. Hierzu können Sparse-Matrix-Techniken eingesetzt werden, die sich die Tatsache zunutze machen, dass die Matrix viele Null-Elemente besitzt [Sarjakoski & Kilpelainen 1999].

Andererseits treten Konflikte üblicherweise lokal auf, bzw. ihr Einflussbereich lässt sich vorab eingrenzen. Im Falle der Generalisierung einer topographischen Karte ist beispielsweise eine sogenannte Verdrängungshierarchie vorgegeben, die angibt, welche Objekte zunächst festzuhalten sind [Schittenhelm 1978]. Hier kann z.B. festgelegt werden, dass das Straßennetz als fix anzusehen ist, während sich die Gebäude bewegen dürfen. Damit kann eine Unterteilung des Gesamtgebiets in kleinere Teilgebiete realisiert werden, welche unabhängig voneinander generalisiert werden können. Für ein operationelles System sind daher zunächst die bedeutenden Objekte zu identifizieren. Diese werden als fix bzw. nicht verschiebbar charakterisiert und geben dann den Rahmen vor für die Bearbeitung der einzelnen Teile (divide and conquer). Die Bestimmung des Straßennetzes ist leicht automatisierbar. Auf diese Weise kann die Abarbeitung leicht modularisiert werden.

Das Verfahren betrachtet die Objekte als individuelle Einheiten. In konkreten Generalisierungssituationen kann es vorkommen, dass einige Objekte zusammen eine Einheit bilden, deren Struktur es auch nach der Verdrängung noch zu erhalten gilt. Ein Beispiel ist eine Häuserzeile, in der ein Gebäude auf charakteristische Art und Weise zurückgesetzt ist. Diese Eigenschaft wird im vorliegenden Verfahren nicht explizit beibehalten, da sie als solche nicht modelliert wird. Eine Erweiterung muss dahin gehen, solche Strukturen vorab zu erkennen, um sie dann anschließend in den Prozess mit einführen zu können. Dies ist denkbar, indem zusätzliche Bedingungen eingeführt werden, die etwa die relative Lage, Orientierung, Flucht von Objekten beschreiben.

Eine weitere Erweiterung ermöglicht eine Rektifizierung von genähert rechtwinkligen Objekten. Diese Funktionalität ist dann sinnvoll, wenn es sich um künstliche Objekte handelt, deren Charakteristik (Geradlinigkeit, Rechtwinkligkeit) innerhalb der Verdrängung hervorgehoben und betont werden kann. Diese Bedingung kann sehr leicht eingeführt werden, indem in der Beobachtungsgleichung für die Objektinnenwinkel Soll-Beobachtungen vorgegeben werden: genähert rechte Winkel werden auf exakt 90° gesetzt, genäherte Geraden auf exakt 180° . Eine ähnliche Erweiterung betrifft die Behandlung des Schnitts linearer Objekte: typischerweise werden Einmündungen von Straßen rechtwinklig gestellt. Solch eine Modellierung kann integriert werden [Harrie 1999].

Der Ansatz wurde in einer deklarativen, listenorientierten Programmiersprache implementiert (POP11 [Barrett, Ramsay & Sloman 1985]). Er lässt sich sehr gut in eine Objekt-orientierte Struktur einbetten, auf deren Basis sich die Parametrisierung noch flexibler durchführen lässt. Jedes Objekt kann aufgrund seiner Zugehörigkeit zu einer Objektklasse bzw. aufgrund individueller Eigenschaften unterschiedlich behandelt werden.

Auch die Abstände zwischen den Objekten lassen sich objektabhängig parametrisieren: So können für unterschiedliche Objekte unterschiedliche Minimalabstände existieren. Der Abstand zwischen zwei Objekten gleichen Typs, etwa zwei Gebäuden, kann geringer sein, als der Abstand heterogener Objekte (Gebäude — Straße). Diese Erweiterung wurde beispielhaft anhand der Typisierung durchgeführt, welche im Kapitel 5.4.1, S. 77 beschrieben wird.

Der Ansatz geht davon aus, dass lediglich kleine Verschiebungen der Objekte vorkommen. Bei größeren Veränderungen der Situation kann es zu Änderungen der Topologie in der Dreiecksstruktur kommen, welche dann die Nachbarschaftsstruktur nicht mehr korrekt widerspiegeln würde. Eine Abhilfe ist hier möglich, indem nach jeder Iteration eine Neu-Triangulierung durchgeführt wird.

Das Verfahren setzt voraus, dass alle Nachbarschaften aus der Dreiecksstruktur ablesbar sind. Dies ist jedoch nicht immer unmittelbar gegeben. Man stelle sich eine lange, gerade Straße vor – gegeben durch Anfangs- und Endpunkt – an der einige Gebäude stehen. Die Dreiecksvermaschung über alle Objektpunkte kann nur Anfangs- und Endpunkt der Straße nutzen. Ist eines der Gebäude etwas zurückgesetzt gegenüber den anderen, so wird seine Nachbarschaft zur Straße nicht wiedergegeben werden, wenn sich keine Dreieckskante zum Straßenendpunkt ziehen lässt. Das Grundproblem liegt hierbei darin, dass eine sog. Constrained Delaunay Triangulation durchgeführt wurde, welche erzwingt, dass die Objektseiten auch Dreiecksseiten darstellen. Dies kann zu nicht-gleichseitigen Dreiecken führen (d.h. Dreiecken, bei denen das Delaunay-Prinzip nicht erfüllt ist). Abhilfe schafft hier die Einführung zusätzlicher Objektpunkte (Steinerpunkte) durch eine sogenannte *konforme Triangulierung*.

Eine zusätzliche Erweiterungsmöglichkeit betrifft das mathematische Ausgleichungsmodell. Mittels der beschriebenen quadratischen Optimierung im Rahmen der kleinste Quadrate Ausgleichung werden Beobachtungen bezüglich der Abstände in Form von Gleichungen formuliert. Hier liegt eine Beschreibung in Form von Ungleichungen eigentlich näher: die Abstände zwischen den Objekten sollen *größer oder gleich* dem Minimalabstand sein – sie dürfen nur nicht kleiner werden. Im gegenwärtigen Ansatz werden die Abstände exakt auf diese Minimaldistanz gesetzt (für den Fall, dass die eigentlichen Abstände zu gering sind). Dies kann in Extremfällen zu Regularisierungen der Verteilung führen (vgl. auch [Burghardt & Meier 1997b]).

Die Einführung von Ungleichungen hätte Vorteile in bestimmten Situationen: liegen die aktuellen Distanzen im Bereich der Minimaldistanz, so wird diese exakt erzwungen, indem diese Beobachtung mit einem hohen Gewicht belegt wird. Wird die Situation jedoch aufgrund anderer Gegebenheiten anderweitig 'entkrampft' – indem etwa das Konfliktobjekt weg bewegt wird, so führt das aufgrund des hohen Gewichts dazu, dass das Objekt mit seinem Nachbarn zusammen verschoben wird, und sich von diesem nicht mehr lösen lässt.

Aufgrund der gegebenen Anwendung der Visualisierung von Geo-Objekten erfolgte die Implementierung in 2D – eine räumliche Erweiterung ist jedoch prinzipiell denkbar.

Generell ist das Verfahren in der Lage, kontinuierliche Veränderungen des Datenbestandes vorzunehmen, um somit räumliche Konflikte aufzulösen. In manchen Situationen sind jedoch un stetige Änderungen im Datenbestand nötig, welche nicht durch kontinuierliche Operationen gelöst werden können. Zunächst könnte hier eine Vorabanalyse klären, ob genügend Freiraum vorhanden ist, etwa mit einem Dichtemaß [Ruas & Mackaness 1997]. Allerdings liefert auch das Verfahren Hinweise darauf, wann solche Sprünge nötig sind. In diesen Fällen gilt es, die Struktur in den Daten zu erkennen und mit entsprechenden Maßnahmen beizubehalten – was ein Interpretationsproblem darstellt.

Der Ansatz stellt somit ein globales Verfahren dar, um räumliche Konflikte zu beseitigen.

5.3 Weitere Generalisierungsoperatoren

Der Ansatz ist sehr allgemein, er lässt eine Erweiterung auf weitere Generalisierungsmethoden zu. Dies soll im Folgenden skizziert werden.

5.3.1 Betonen

Das Hervorheben bzw. Zurücknehmen von Objekten kann leicht in den allgemeinen Ausgleichungsansatz zur Verdrängung integriert werden, indem die entsprechenden Objekte vergrößert bzw. verkleinert werden. Dazu werden objektspezifisch Skalierungsfaktoren eingegeben. Im Programmsystem PUSH wird dieser Faktor den jeweiligen Objektseiten beigegeben.

Die Objektseite ergibt sich aus der euklidischen Distanz aus den Koordinaten der Endpunkte. Als Soll-Beobachtung wird in diesem Fall nicht die ursprüngliche Länge eingesetzt, sondern die mit dem Faktor *fact* versehene.

$$\begin{aligned} l_{soll} &= fact * f(x) \\ &= fact * \sqrt{(x_e - x_a)^2 + (y_e - y_a)^2} \end{aligned}$$

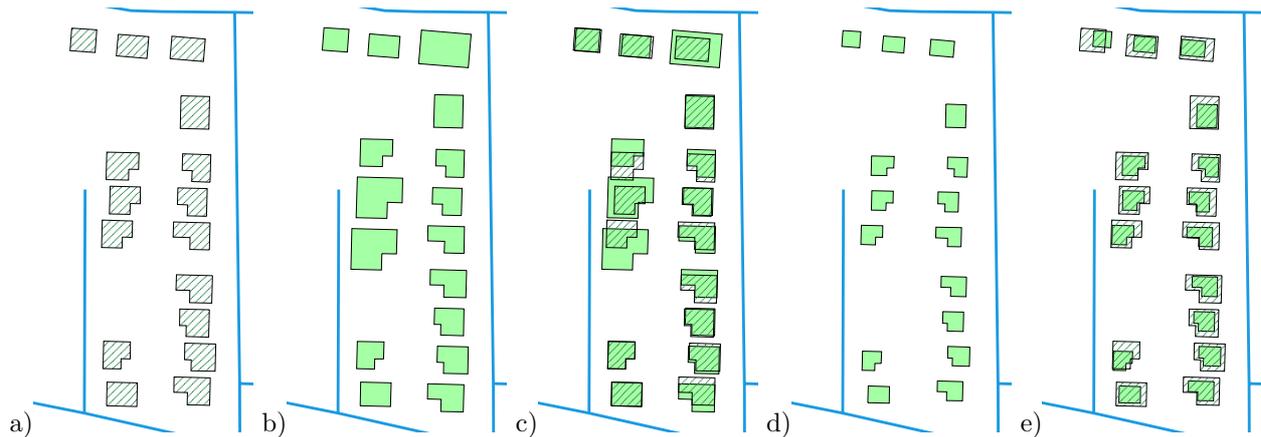


Abbildung 5.24: *Situation vor der Generalisierung (a); Wirkung der Verdrängung und Skalierung individueller Gebäude (b,c) bzw. aller Gebäude (d,e).*

Das Einsetzen der Soll-Beobachtung führt zu einem zusätzlichen Zwang, welcher in der Ausgleichung aufgelöst wird. Damit erfolgt diese Skalierung integriert mit der gesamten Verdrängung. Dies bedeutet insbesondere, dass Konflikte, wie sie durch die Skalierung entstehen, direkt ausgeglichen werden, d.h. es erfolgt eine Generalisierung in einem Guss.

Der Skalierungsfaktor muss vorab bekannt sein. Er kann objektklassenspezifisch vorgegeben sein, indem z.B. alle Gebäude eines bestimmten Typs mit einem bestimmten Faktor versehen werden, oder er kann sich auf individuelle Objekte beziehen. Die Anwendung der Betonung kann aber auch aus dem Kontext ermittelt werden: So kann z.B. ein kleines, freistehendes Gebäude vergrößert werden. Die Tatsache, dass es freistehend ist, wird dabei über seine Nachbarschaft bestimmt, welche direkt durch der Analyse der Triangulation ermittelt werden kann.

Abbildung 5.24 zeigt den Effekt dieser Funktionalität. Im ersten Beispiel (b) werden drei Gebäude der Originalsituation (a) vergrößert. In der Überlagerung (c) wird deutlich, dass die Konflikte, die durch die Vergrößerung entstehen, durch die Verdrängung der Gebäude gelöst werden. Im zweiten Beispiel werden alle Gebäude um den Faktor 0.7 verkleinert (d), wobei in (e) eine Überlagerung mit der ursprünglichen Situation zu sehen ist.

5.3.2 Aggregation

Eine Variante dieser Funktionalität ist im Ansatz bereits implementiert: Fällt die Distanz zweier Objekte unter eine vorzugebende kritische Distanz, so wird die Solldistanz auf Null gesetzt. Dies bedeutet jedoch noch nicht, dass die Objekte wirklich verschmolzen werden. Allerdings wird erreicht, dass ihr Abstand minimiert wird. Die eigentliche Verschmelzung kann über eine nachträgliche Operation erfolgen.

5.4 Typisierung

Die Typisierung verlangt ein Ausdünnen des Datensatzes unter Beibehaltung der ursprünglichen Struktur. So soll etwa die typische Objektdichte auch nach der Generalisierung noch sichtbar sein. Im Falle eines Siedlungsgebietes betrifft dies die Anordnung der Gebäude, während es sich bei natürlichen Phänomenen um Objektgruppen, das Verhältnis von großen und kleinen Objekten sowie ihre Verteilung handelt.

Für unregelmäßige, flächenhafte, natürliche Objekte liefert der Vorschlag von Müller & Wang [1992] sehr gute Ergebnisse. Er lässt sich jedoch nicht unmittelbar auf regelmäßige, punktförmige Objekte übertragen.

Im Folgenden werden zwei Vorschläge gemacht, wie diese Typisierung für räumlich verteilte, gleichartige und gleichwertige, punktförmige Objekte zu erreichen ist:

1. Clusterdetektion und anschließende Verdrängung

2. Anwendung von Kohonen Feature Maps

In beiden Fällen wird davon ausgegangen, dass das Maß der Reduktion, d.h. die Anzahl der zu eliminierenden Objekte, bekannt ist. Eine bloße Reduktion allein, d.h. ein Entfernen einer gewissen Anzahl der Objekte, ist natürlich direkt möglich; allerdings kann so die Erhaltung der Objektverteilung (ihre Dichteverhältnisse) nicht garantiert werden. Diese ist nur möglich, wenn gezielt repräsentative Objekte ausgewählt werden (z.B. [Töpfer 1976]), oder wenn eine Neu-Anordnung der Objekte gemäß der ursprünglichen Dichteverteilung durchgeführt wird. Letztere Möglichkeit wird bei den beiden im Folgenden vorgestellten Verfahren eingesetzt.

5.4.1 Clusterdetektion und anschließende Verdrängung

Eine erste Lösungsmöglichkeit liefert der oben vorgestellte Algorithmus zur Verdrängung. Ist bekannt, welche Objekte zusammengehören, bzw. gleichartig verdrängt werden müssen, lässt sich das Typisierungsproblem sehr leicht in den Verdrängungsmechanismus integrieren: eine gewisse Anzahl der Objekte eines Clusters wird eliminiert, für die verbleibenden Objekte wird gefordert, dass sie einheitliche Abstände aufweisen. Dies kann als Zwang in das Gleichungssystem eingebracht werden.

5.4.1.1 Cluster Erkennung

Zunächst stellt sich jedoch das Problem, die Cluster zu detektieren, d.h. die Objekte zu identifizieren, die eine einheitliche Struktur aufweisen. Ferner ist es noch wichtig, die Abstände innerhalb eines Clusters zu bestimmen. Typische Clusterverfahren (auch als unüberwachte Klassifizierung bezeichnet) benötigen Vorinformation, etwa die Anzahl der zu erwartenden Cluster, die Verteilung der Cluster, oder Abstände zwischen den Clustern. Solche Schwellwerte müssen über Erfahrungswerte oder Testläufe mit dem Datensatz ermittelt werden.

Wünschenswert sind Verfahren, welche ohne Schwellwerte auskommen. Hierzu wurde von K.-H. Anders ein Clusterverfahren entwickelt, welches sehr flexibel ist, da es ohne Parameter auskommt [Anders, Sester & Fritsch 1999]. Das Verfahren baut eine Hierarchie von Nachbarschaftsgraphen auf, und bildet innerhalb dieser Hierarchie sukzessive Objektgruppen. Das Kriterium für die Bildung einer Gruppe (Cluster) sind hierbei ähnliche Clustercharakteristika: Objekte eines Nachbarschaftsgraphen werden dann zusammengefasst, wenn sie ähnliche Dichtewerte aufweisen [Anders & Sester 2000]. Für die Clusterbestimmung ist es von großer Bedeutung, dass die eingesetzten Nachbarschaftsgraphen folgende Teile-von-Hierarchie bilden: Nächster Nachbar-Graph (NNG) – Relativer Nachbarschaftsgraph (RNG) – Gabriel Graph (GG) – Delaunay Triangulation (DT). Damit können bottom-up Cluster aggregiert werden, indem die Ergebnisse auf einer Stufe in die nächst höhere Hierarchiestufe eingebracht werden. Auf diese Weise können im Nachbarschaftsgraphen Näherungen für Cluster gefunden werden, die in den folgenden Graphen verfeinert werden. Grundsätzlich können die Ergebnisse dieser Clustersequenz erneut in einer zweiten Iteration geclustert werden. Als Ergebnis stehen schließlich die Cluster zusammen mit ihren Charakteristika zur Verfügung. Für die folgende Prozessierung wichtigste abgeleitete Eigenschaft ist hierbei die mittlere Clusterdichte, der mittlere Clusterabstand.

5.4.1.2 Objekte Eliminieren

Sind die Cluster identifiziert, so werden in ihnen Objekte eliminiert. Die Auswahl kann zufällig erfolgen und entsprechend dem vorgegebenen Reduzierungsmaß durchgeführt werden. Durch die zufällige Entfernung von Objekten entstehen jedoch Lücken. Diese müssen anschließend derart geschlossen werden, dass die ursprünglichen Dichteverhältnisse der Situation wieder eingehalten sind.

5.4.1.3 Integration in das Verdrängungsprogramm PUSH

Das Verdrängungsprogramm wurde dahingehend erweitert, dass die Abstände in Abhängigkeit von den beteiligten Objekten gesetzt werden. Es wird also beim Aufstellen der Beobachtungsgleichungen überprüft, ob die beiden beteiligten Objekte aus einem Cluster stammen. Wenn ja, wird der zugehörige, im Clusterverfahren

vorab bestimmte mittlere Abstand angesetzt, ansonsten gelten die üblichen Minimal-Beziehungen. Auf diese Weise wird ein objektabhängiges Distanzmaß eingesetzt.

Die Vorgehensweise soll anhand eines konkreten Beispiels verdeutlicht werden. Abbildung 5.25a) zeigt einen Baublock mit verschiedenen Gebäudeclustern vor der Generalisierung.

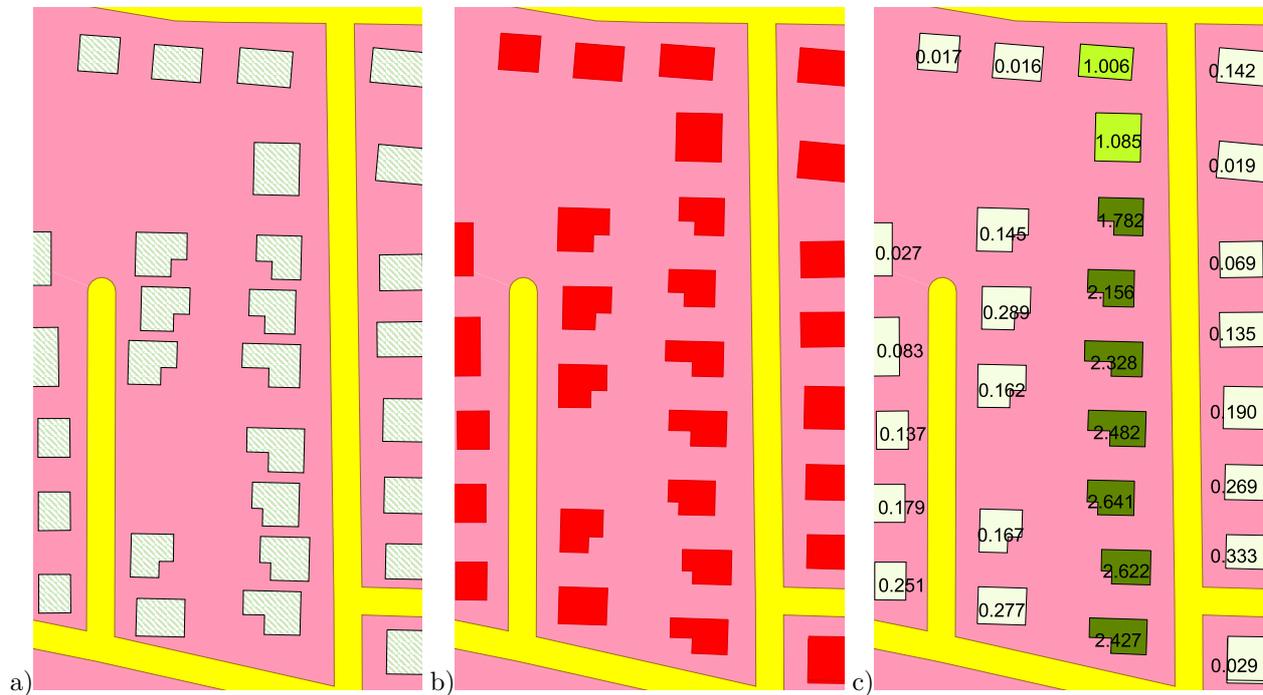


Abbildung 5.25: Anwendung der Verdrängung in einem Gebiet mit zu hoher Objektdichte (links); starke Deformationen der Objekte und ungewolltes Schließen der Freiräume (Mitte); Deformationsbeträge in [m] (rechts).

Wird dieser direkt in PUSH prozessiert, so ergibt sich der unerwünschte Effekt, dass die Gebäude in die Freiräume (hier Baulücken) gedrängt, und zusätzlich noch deformiert werden. Nach der Verdrängung entsteht der Eindruck einer durchgehenden Häuserreihe (Abb. 5.25b)). Die Qualitätsmaße des Verdrängungsprogramms geben allerdings einen Hinweis darauf, dass hier sehr starke Deformationen vorliegen und somit die Verdrängung nicht ideal ist (vgl. Abbildung 5.25c)).

In diesem Falle muss zunächst typisiert werden. Das Ergebnis des oben beschriebenen Clusteralgorithmus ist in Abbildung 5.26 gegeben. Die Darstellung zeigt die Resultate des hierarchischen Clusterings auf den verschiedenen Nachbarschaftsgraphen. Die Bearbeitung erfolgte in zwei Iterationen. In einer ersten Iteration wurden Cluster von NNG über RNG, GG und DT aggregiert (obere Reihe in Abbildung 5.26). Dieses Ergebnis fließt ein als Startsituation in eine zweite Clustersequenz, welche in der unteren Reihe in Abbildung 5.26 dargestellt ist. Unten rechts ist das Ergebnis wiedergegeben. Es identifiziert fünf Cluster, welche durch unterschiedliche Farben gekennzeichnet sind.

Die Reduktion erfolgt anschließend nach der folgenden Strategie: im Cluster mit der größten Anzahl an Objekten wird reduziert – in diesem Beispiel wird ein Objekt aus dem Vierer-Cluster rechts unten eliminiert (Abbildung 5.27,b)). Das Entfernen des zweiten Objektes von oben bewirkt eine Neu-Anordnung der Situation. Deutlich ist zu beobachten, dass der Freiraum ausgenutzt wird, wobei die Objektgruppen und ihre charakteristischen Distanzen erhalten bleiben (Abbildung 5.27,c)). Die Objekte werden jetzt nur noch geringfügig deformiert (vgl. Abb. 5.27d)): der größte Wert liegt bei 0.32m – im Gegensatz zu einer Deformation ohne Typisierung von 2.6m (vgl. Abb. 5.25, rechts).

Wichtig ist zu sehen, dass die Frage der Auswahl eines Objektes von untergeordneter Bedeutung ist: unabhängig von der Wahl des entfernten Objektes bleibt die Charakteristik des Clusters erhalten, da ja die ursprünglichen Abstände eingehalten werden. Allerdings kann die absolute Position des Clusters insgesamt variieren. Die Sequenz in Abbildung 5.28 verdeutlicht dies anhand der übrigen drei Möglichkeiten der Entfernung von einem Objekt aus dem Cluster und ihre jeweiligen Auswirkungen.

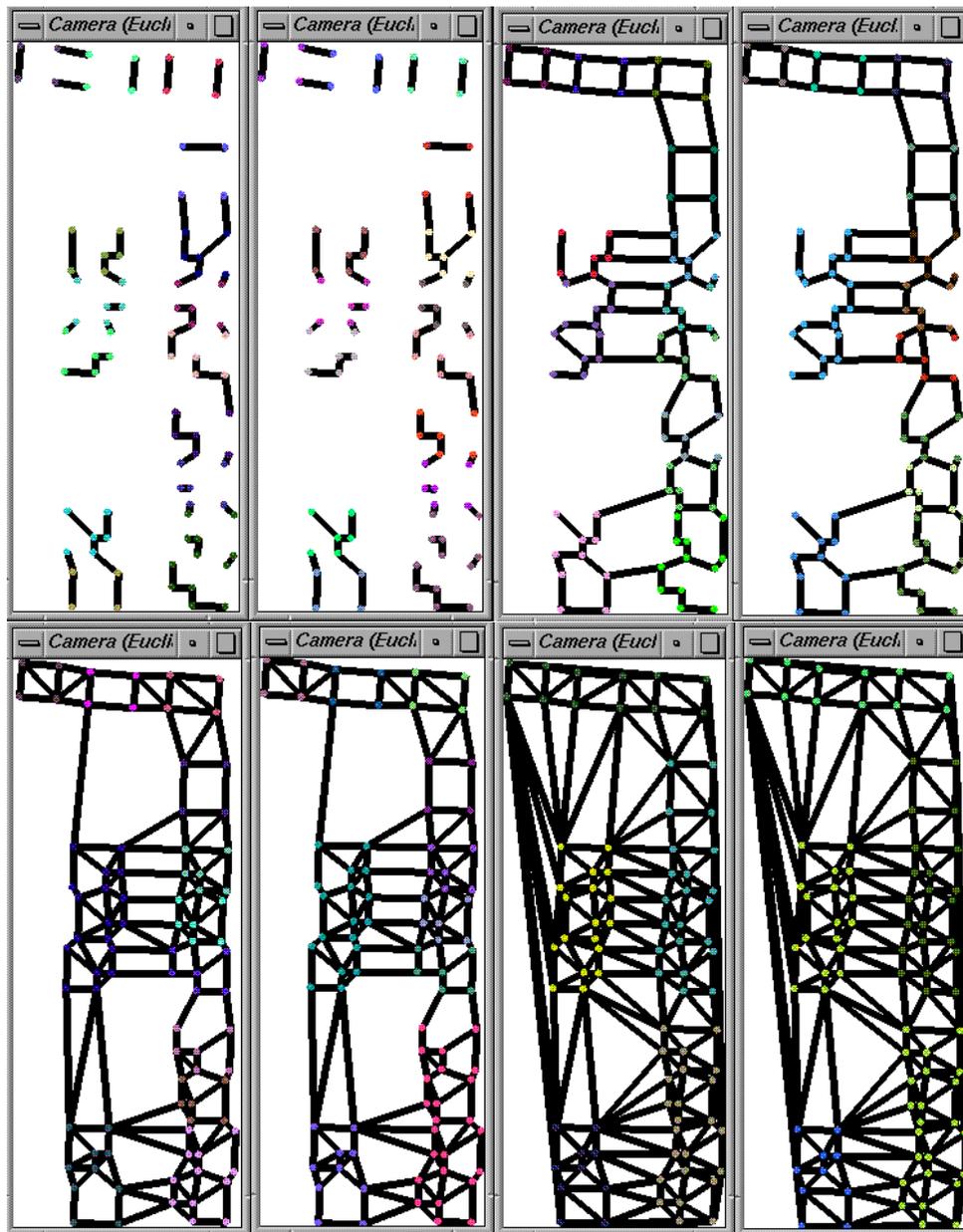


Abbildung 5.26: Sequenz des hierarchischen Clusterings auf den Nachbarschaftsgraphen in zwei Iterationen (oben und unten); rechts unten ist Ergebnis nach der zweiten Iteration zu sehen.

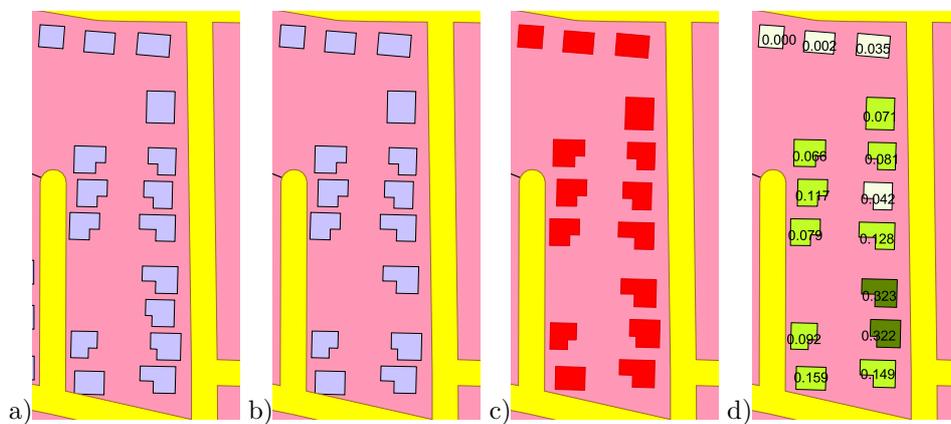


Abbildung 5.27: Ausgangssituation (a); Elimination des zweiten Objekts aus dem Cluster unten rechts (b); Situation nach der Verdrängung (c); Visualisierung der Deformationen der Gebäudeobjekte (d).

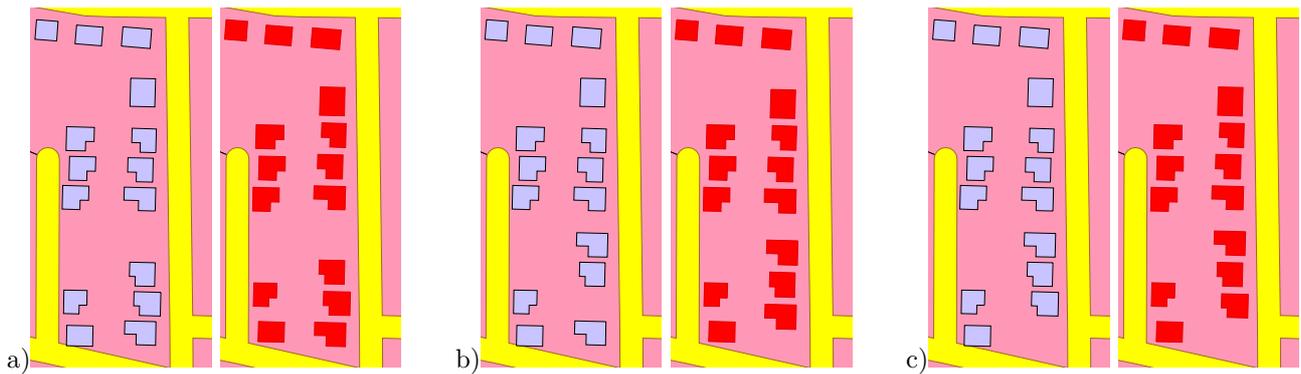


Abbildung 5.28: Bearbeitung der Gebäudegruppe unten rechts, wobei jeweils die Ausgangssituation und das Ergebnis nach der Verdrängung dargestellt ist: Entfernung des obersten Objektes (a), des dritten Objektes (b), sowie des untersten Objektes (c).

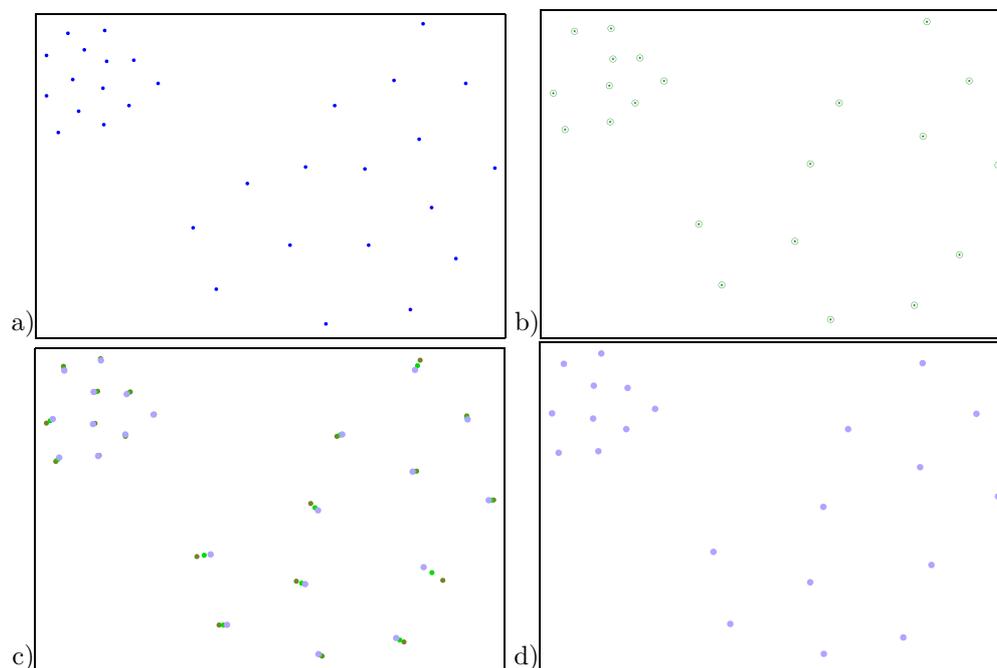


Abbildung 5.29: Typisierung einer 2D-Punktverteilung: Ausgangssituation (a), selektierte Punkte (b), Verschiebung der Punkte im Laufe der Iterationen (c), Ergebnis (d).

Dieses Beispiel zeigt wie *lineare* Strukturen im Cluster typifiziert und verdrängt wurden – d.h. im Beispiel lag eine weitestgehend eindimensionale Situation vor. Der Algorithmus arbeitet jedoch generell auf 2D-Strukturen gleichermaßen. Er führt prinzipiell dazu, dass Objekte eines Clusters regelmäßig angeordnet werden, d.h. es wird eine Regularisierung der Situation erreicht.

Abbildung 5.29 verdeutlicht dies anhand eines Datensatzes, der zwei ausgeprägte Cluster aufweist: links oben ein dichter, rechts unten ein lockerer Punktverband. Die Ausgangssituation (a) wird reduziert, so dass sich die Punktverteilung in (b) ergibt. Diese wird nun iterativ verdrängt, wobei innerhalb der Cluster die vorab ermittelten Clusterabstände eingestellt werden. Sehr gut ist zu beobachten, wie die Lücke im Cluster rechts unten geschlossen wird, indem die übrigen Objekte zusammenrücken.

Wenn die Objekte innerhalb des Clusters in Form eines stark regelmäßigen Rasters angeordnet sind, ergibt sich jedoch ein Problem: werden wiederum zufällig Objekte aus dem Cluster entfernt, so führt die anschließende Verdrängung dazu, dass alle Distanzen einheitlich gesetzt werden, so dass Objekte sich in Richtung der Lücken bewegen und damit die ursprüngliche lineare oder rasterartige Struktur verloren gehen kann, und eine starke Regularisierung eintritt.

5.4.2 Selbstorganisierende Karten – Kohonen Merkmalskarten

5.4.2.1 Allgemeines zu selbstorganisierenden Karten

Selbstorganisierende Karten [Kohonen 1982] gehören zur Klasse der Neuronalen Netze und damit zu den Lernverfahren, speziell zur Gruppe der unüberwachten Verfahren. Neuronale Netze sind generell gekennzeichnet durch eine Sammlung von elementaren Einheiten, den Neuronen, welche miteinander in Verbindung stehen. Ein Zielzustand wird erreicht, indem die Gewichte der Verbindungen in einem Trainingsvorgang verändert werden. Bei üblichen Neuronalen Netzen wie dem Hopfield-Netz oder dem Backpropagation Netz kommt es lediglich auf die Verbindungen zwischen den Neuronen an – die Position der Neuronen spielen keine Rolle. Bei selbstorganisierenden Karten kommt es jedoch auf diese räumliche Anordnung an. Hier stehen nicht nur die Eingangsreize mit den Neuronen in Verbindung, sondern auch noch die Neuronen untereinander. Die Ähnlichkeiten der Eingangssignale werden in Lagerelationen der Neuronen umgesetzt: ähnliche Signale werden von räumlich benachbarten Neuronen beantwortet [Ritter, Martinetz & Schulten 1990]. Die entstehenden Clusterzentren sind in einer räumlichen Struktur angeordnet. Somit entsprechen benachbarten Erregungsorten einer Schicht dann Reize mit ähnlichen Merkmalen.

Kohonen Merkmalskarten können ausgenutzt werden, um eine topologieerhaltende Verteilung von Punkten (Objekten) durchzuführen. Ausgangspunkt ist ein m -dimensionaler Eingangsraum mit Reizen, sowie eine neuronale Schicht – der Kartenraum – der Dimension d , bestehend aus miteinander verbundenen Neuronen. Die Neuronen besitzen durch ihre Gewichte eine Position im Eingaberaum, welche sich iterativ den Reizen anpasst. Wichtiges Merkmal dieses Ansatzes ist die Vernetzung: ein Neuron spricht auf einen Reiz an und ändert darauf seine Gewichte – sprich seine Position – in Richtung auf den Reiz. Allerdings bewirkt dies nun auch eine Änderung der Gewichte seiner Nachbarn, die sich ebenfalls auf den Reiz hin bewegen. Dies hat letztendlich den Effekt, dass sich an räumlichen Positionen mit vielen Reizen auch entsprechend viele Neuronen anlagern. Gebiete mit höherer Reizdichte können somit besser aufgelöst werden, Objekte können besser unterschieden werden, da dort mehr Neuronen zur Verfügung stehen.

Ist der Raum der Reize von höherer Dimensionalität als der Kartenraum, so versucht die Karte den höherdimensionalen Raum möglichst gut durch eine 'Faltung' abzubilden. Eine eindimensionale Neuronenkette wird beispielsweise auf eine 2D-Karte abgebildet, indem sich die Kette in Form einer Peano-Kurve anordnet, um den 2D-Raum der Reize möglichst optimal abzudecken. Auf diese Weise kann beispielsweise eine Lösung für das Travelling Salesman Problem gefunden werden.

Merkmalskarten stellen generell eine Möglichkeit dar, eine Merkmalstransformation durchzuführen [Kohonen 1982]. Beispielsweise hat Kohonen Phoneme auf eine 2D-Karte abgebildet. Hierbei ordneten sich klanglich ähnliche Laute benachbart an. Sie können daher für die Spracherkennung eingesetzt werden. Weitere Anwendung ist die Robotersteuerung [Ritter et al. 1990] und die Bildverarbeitung. Doucette, Agouris, Musavi & Stefanidis [1999] schlagen vor, Merkmalskarten für die Extraktion linienhafter Strukturen in Bildern zu finden. Bayer [1995] zeigt verschiedene Anwendungen von Merkmalskarten, insbesondere auch die Möglichkeit der Approximation von 3D-Oberflächen.

Für die Typisierung können Kohonen Merkmalskarten eingesetzt werden, da sie die Fähigkeit haben, die Dichte im Eingaberaum zu approximieren.

5.4.2.2 Grundlagen des Lernens von Kohonen Merkmalskarten

Die folgenden Ausführungen orientieren sich an [Ritter et al. 1990] und [Brenner 1994]. Gegeben ist ein Eingaberaum \mathbf{E} der Dimension m mit Reizen x , sowie ein Kartenraum \mathbf{A} der Dimension d mit Neuronen, wobei d üblicherweise ein- oder zweidimensional ist. Jedes Neuron im Kartenraum wird durch ein Tupel $U = (w, p)$ beschrieben, d.h. einem Gewicht w aus \mathbf{E} und einer Position p aus \mathbf{A} . Aus der Position p können die Nachbarn des Neurons bestimmt werden. Das Gewicht w gibt an, auf welchen Reiz das Neuron am stärksten reagiert. Häufig werden diese Positionen in äquidistanten, diskreten Gittern vorgegeben. Die a priori Gewichtung erfolgt zufällig, wenn über die Struktur der Karte keine Information vorliegt. Andernfalls kann diese Information einfließen.

Der Algorithmus lässt sich wie folgt beschreiben:

- ▷ Stimuluswahl: Aus der Menge der Reize Im Eingangsraum wird zufällig ein Reiz v ausgewählt.
- ▷ Response: Es wird das Neuron U_c bestimmt, dessen Gewicht dem Reiz am ähnlichsten ist. Ähnlichkeit wird hier durch räumliche Nähe definiert. Dies kann durch Berechnung der euklidischen Distanz zwischen dem Reiz und allen anderen Neuronengewichten ermittelt werden:

$$\|v - w_c\| \leq \|v - w_r\| \quad \text{für alle } r \in \mathbf{A}.$$

- ▷ Anschließend werden die Gewichte des Neurons sowie der Neuronen seiner Umgebung angepasst, so dass die Gewichte dem Reiz ähnlicher werden.

$$w_r^{neu} = w_r^{alt} + \eta h(v - w_r^{alt}),$$

wobei diese Adaption von den Parametern η und h abhängt.

- ▷ Diese Lernschritte werden iterativ ausgeführt, bis ein Abbruchkriterium erreicht ist.

Abbildung 5.30 verdeutlicht dies anhand einer eindimensionalen Situation: ein Reiz (oben) stimuliert die Neuronen, wobei das mittlere Neuron, dessen Gewicht (Position) dem Reiz am nächsten ist, sein Gewicht am stärksten auf den Reiz hin adaptiert. Seine Nachbarn ändern ihre Gewichte ebenfalls, jedoch in geringerem Maße. Die Stimulation mit diesem Reiz bewirkt schließlich, dass sich die Neuronenkette auf den Reiz zu bewegt.

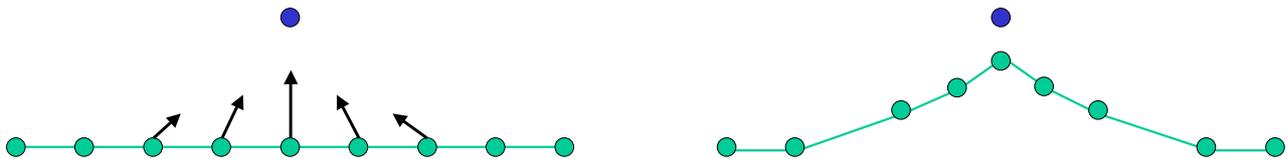


Abbildung 5.30: *Eindimensionale Situation: Reiz (oben) löst eine Gewichtsänderung der Neuronen, sowie deren Nachbarn aus (links), Ergebnis der Anpassung (rechts).*

Im Laufe der Iterationen verringern sich die Verschiebungsmöglichkeiten, mit dem Ziel einer zunehmenden Einstellung auf den Endzustand. Steuerparameter hierfür sind die Lernrate $\eta(t)$, sowie die Erregungsantwort $h(dist, \sigma(t))$, welche die Gewichtung des Gewinner-Neurons und seiner Nachbarn in Abhängigkeit der Anzahl der Epochen t beschreibt.

Als Erregungsantwort $h(dist, \sigma)$ dient eine Funktion, die ihr Maximum bei $dist = 0$ hat und für große Abstände gegen Null geht. Im einfachsten Fall kann dies eine stückweise konstante Funktion sein, die den Wert 1 liefert für $x \leq \sigma$, und 0 sonst. Eine weitere geeignete Wahl ist die Gaussfunktion:

$$h(dist, \sigma) = e^{-\frac{dist^2}{2\sigma^2}}$$

wobei der Radius σ entsprechend der Trainingszeit variiert wird: um die Grobstruktur der Karte zu bilden, sollte er zunächst groß sein, anschließend jedoch kleiner werden, zur Ausbildung der lokalen Feinstruktur. D.h. es sollte eine mit der Anzahl der Lernschritte abnehmende Funktion $\sigma(t)$ eingesetzt werden. Die Reichweite der Funktion ist damit am Anfang – in der Ordnungsphase – hoch. Somit wird eine optimale Verteilung der Neuronen erreicht. Mit wachsender Anzahl an Epochen verringert sich die Reichweite und bewirkt, dass die Änderungen nur noch lokal sind, und führt somit zur Konvergenz.

5.4.2.3 Anwendung für die Typifizierung

Kohonen Merkmalskarten haben die Fähigkeit, die Dichte im Eingaberaum zu approximieren. Dies macht sich der folgende Ansatz für die Typisierung zunutze. Der Kohonen-Ansatz kann derart verwendet werden, dass die ursprüngliche Struktur der räumlichen Situation in Form des Eingaberaums \mathbf{E} gegeben ist, d.h. die Reize darstellt. Sie ist von der Dimension $m = 2$. Als Kartenraum \mathbf{A} wird eine reduzierte Objektverteilung gewählt, sie ist damit auch von der Dimension $d = 2$. Die Anzahl der Objekte im Kartenraum wird über einen vorgegebenen

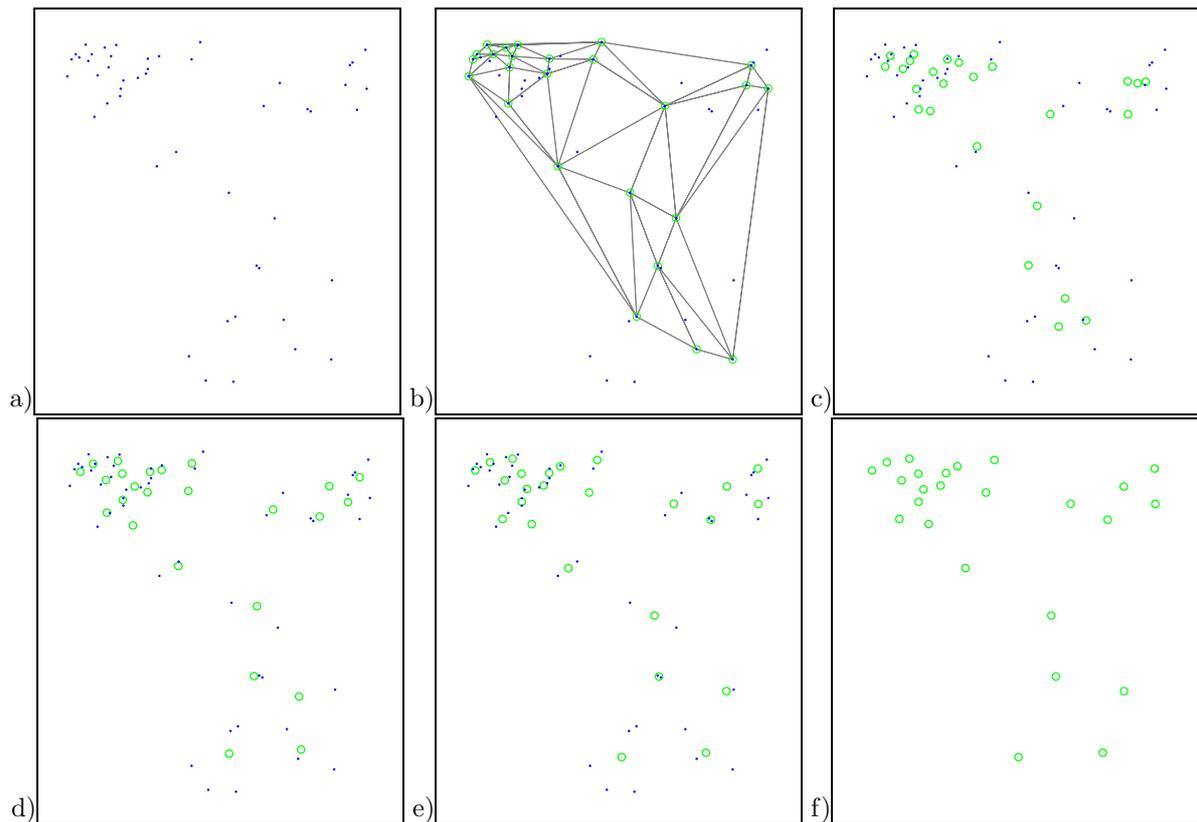


Abbildung 5.31: *Eingangs- und Ausgangskarte – Reduktionsfaktor 50%, Triangulation zur Bestimmung der Nachbarn, sukzessive Adaption (von links nach rechts), sowie Ergebnis des Lernverfahrens (unten rechts).*

Reduktionsfaktor bestimmt (z.B. Töpfer-Regel); die Objekte werden zufällig ausgewählt. Die Objekte sind dabei als Punkte gegeben. Ziel ist es, die reduzierten Objekte derart zu verteilen, dass sie die Struktur (Dichte, Verteilung) der ursprünglichen Objekte wiedergeben.

Der Kartenraum der Neuronen setzt sich aus einem gewissen Prozentsatz der Objekte des Eingaberaums zusammen. Ihre Gewichte (Positionen) werden hier direkt übernommen, da hier schon sehr gute a priori Information über die Positionen vorliegt. Auch ihre Topologie liegt fest: Die Nachbarschaft ergibt sich durch eine Delaunay-Triangulation. In diesem Falle werden nur die nächsten Nachbarn der Objekte mit einbezogen. Dies legitimiert sich dadurch, dass die Näherungswerte schon sehr genau sind und sich die Objekte schon nahe an ihrer Zielposition befinden. Ist dies nicht der Fall, so müssen größere Nachbarschaften einbezogen werden. Zusätzlich geht im Updateschritt auch noch die Distanz des Gewinnerneurons zu seinen Nachbarn mit ein. Dazu wird der Radius σ der Erregungsantwortfunktion auf den mittleren Abstand der Objekte im Netz gesetzt. Hiermit wird erreicht, dass Objekte, die in der Nähe sind, stärker berücksichtigt werden als weit entfernte Nachbarn.

Im Folgenden soll die Arbeitsweise des Verfahrens zunächst anhand von kleineren Beispielen verdeutlicht werden. In den Abbildungen sind die Reize als dunkle Punkte dargestellt, während die Neuronen als Kreise visualisiert werden. Abbildung 5.31, links, zeigt eine zufällige Struktur von punktförmigen Objekten. Zunächst wird ein gewisser Prozentsatz an Objekten selektiert, hier 50%, die die Neuronen darstellen. Diese werden durch eine Delaunay-Triangulation vermascht (Abbildung 5.31,b), wodurch ihre Nachbarschaft festliegt. Deutlich zeigt sich in der Sequenz der Abbildungen 5.31, c),d),e) wie die Neuronen sich während des Trainings zunächst stark auf die Mitte zubewegen, um die Grobstruktur der Karte auszubilden. In späteren Lernschritten erfolgt die lokale Anpassung an die ursprünglichen Reize. Als Ergebnis stellt sich die Situation in Abbildung 5.31,f) ein. Es zeigt, wie die Dichteverhältnisse der ursprünglichen Situation durch die Typifizierung deutlich beibehalten werden: sowohl die hohe Objektdichte im Bereich links oben, als auch die weiteren Cluster werden mit reduzierter Objektanzahl wiedergegeben.

Das nächste Beispiel zeigt eine regelmäßige Punktverteilung, die jedoch zwei unterschiedliche Dichten aufweist. Die Sequenz in Abbildung 5.32 gibt Zwischenergebnisse wieder. Nach 50 Iterationen stellt sich das Ergebnis

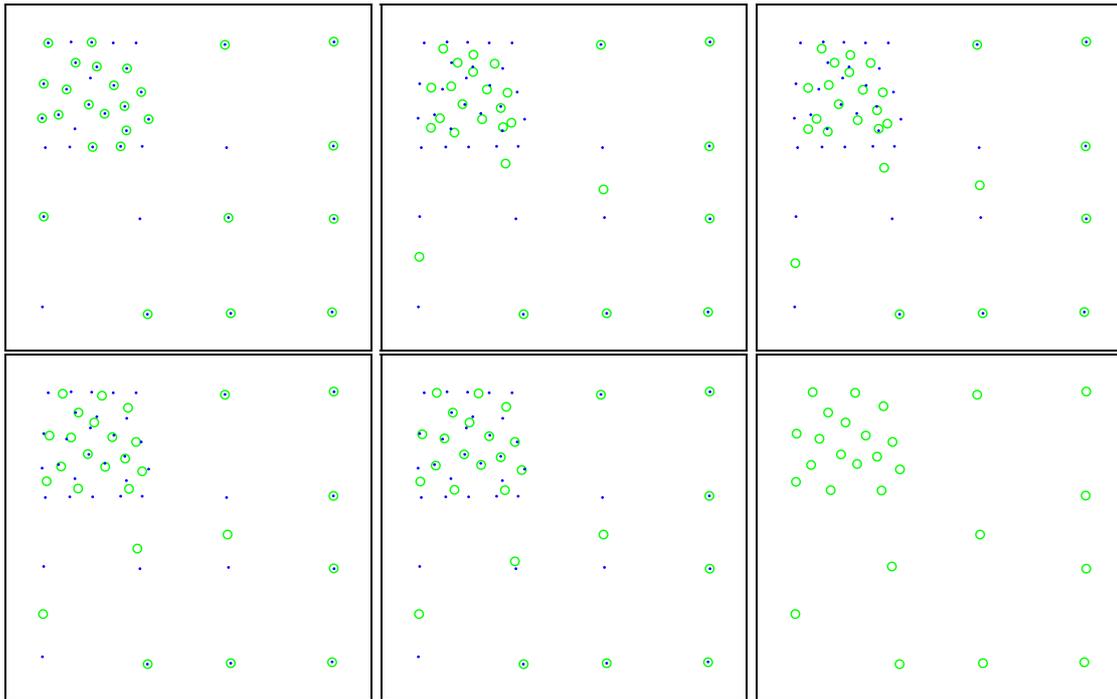


Abbildung 5.32: Ausgangszustand mit Reduktion auf 70% (links oben), Zwischenschritte nach je 10 Iterationen, sowie Ergebnis des Lernverfahrens (unten rechts).

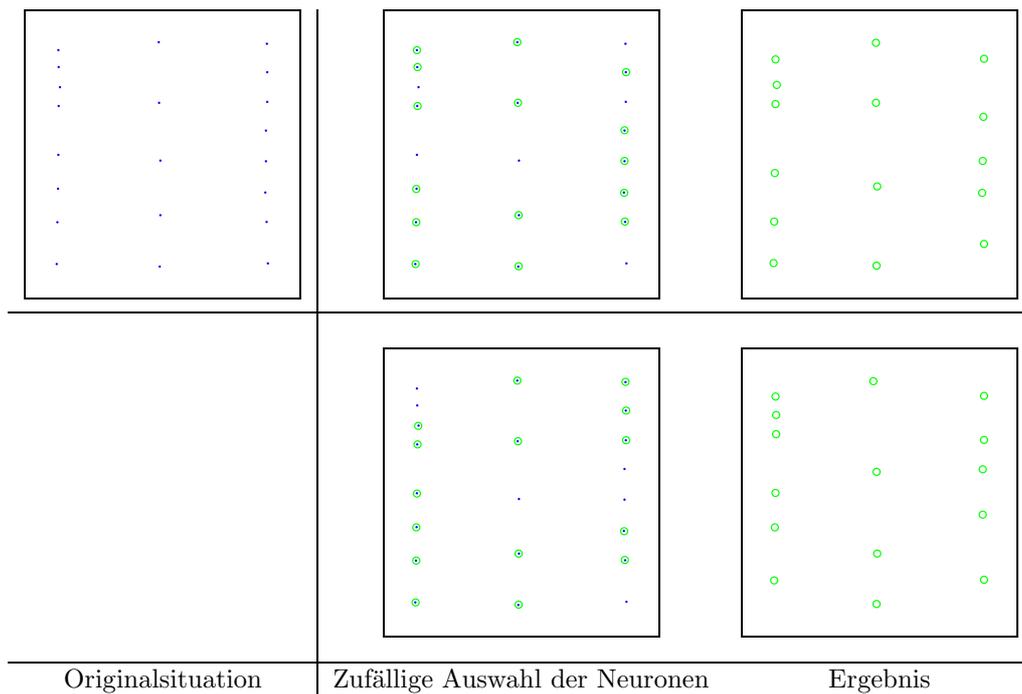


Abbildung 5.33: Originalsituation (links); Vergleich der Ergebnisse bei unterschiedlichen Startsituationen, jeweils mit Reduktionsfaktor von 70%.

ein: die Lücken zwischen den Objekten wurden entsprechend der ursprünglichen Verteilung gefüllt, indem die Neuronen an die Positionen zwischen den Reizen wanderten (Abbildung 5.32, rechts).

Im folgenden Beispiel (Abbildung 5.33) ist eine stark regelmäßige Struktur gegeben, jedoch liegen hier unterschiedliche Abstände zwischen den Punkten vor. Die Situation zeigt drei Reihen mit Objekten, wobei die erste Reihe in sich unterschiedliche Abstände aufweist, die anderen beiden jeweils gleichabständig sind. In diesem Beispiel soll verdeutlicht werden, dass das Ergebnis der Typifizierung diese Dichteverhältnisse ansprechend wie-

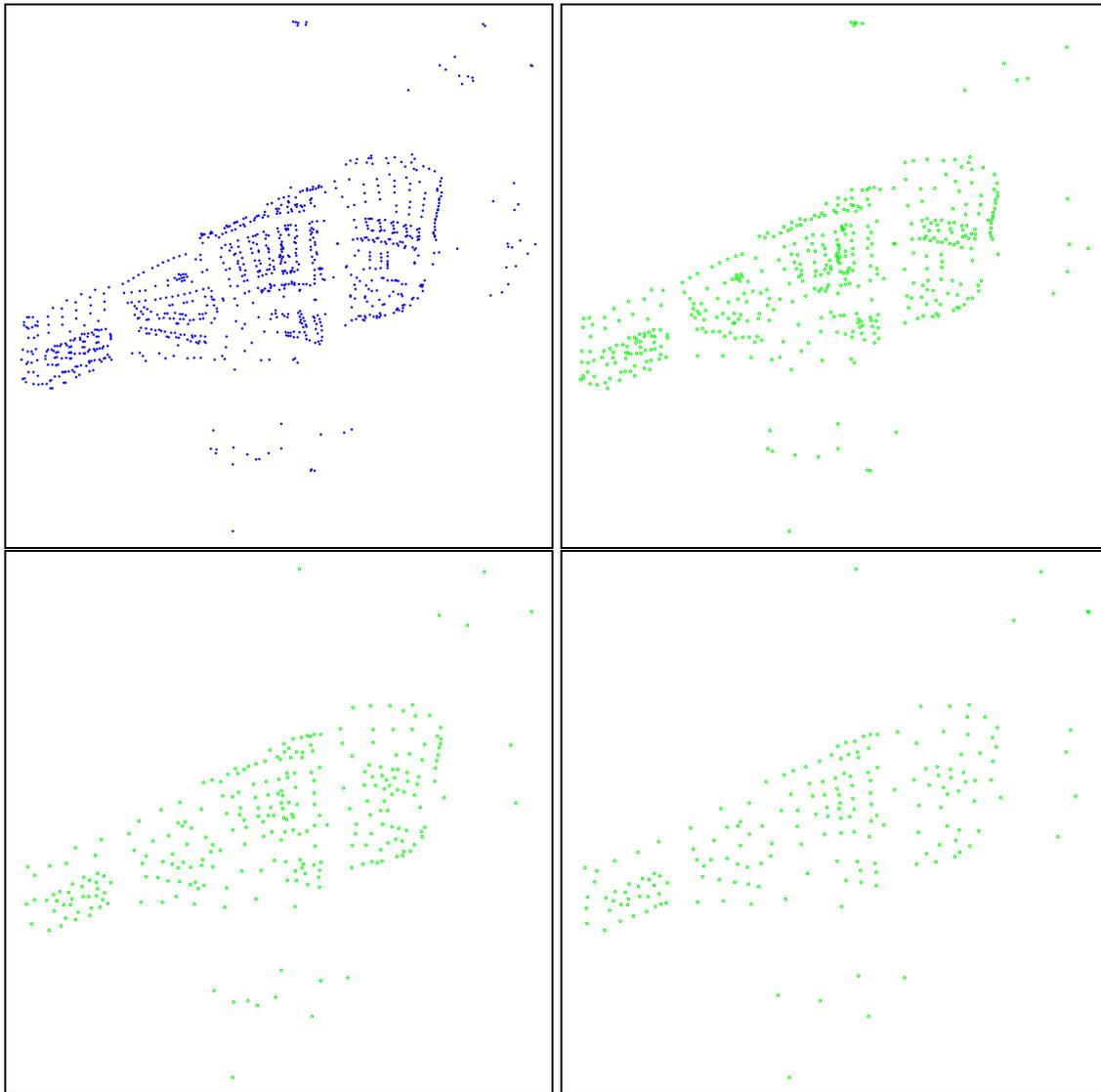


Abbildung 5.34: Reduktion des Gebäudebestandes eines Stuttgarter Vororts (Büsnau): ursprüngliche Situation (oben links), Reduktion auf 50% (oben rechts), Reduktion auf 30% (unten links), Reduktion auf 20% (unten rechts).

dergibt – wobei sich abhängig von der zufälligen Auswahl der Neuronen leicht unterschiedliche Verteilungen ergeben. In Abbildung 5.33 ist jeweils die Ausgangssituation und das Ergebnis für zwei Testläufe dargestellt. Der Reduktionsfaktor lag hier bei 70%.

5.4.2.4 Typifizierung von Gebäudedatenbeständen

Zur Bearbeitung eines größeren Gebäudebestandes wurden die Gebäude zunächst von einer flächenhaften Struktur in eine punktförmige Gestalt überführt, indem sie durch ihre Zentroide approximiert wurden. Dieser Datensatz wurde anschließend um 50% reduziert, indem zufällig Gebäude ausgewählt wurden. Diese bilden, wie oben beschrieben, das Neuronennetz, während alle ursprünglichen Gebäude die Reize darstellen. Die Ausgangssituation und das Ergebnis sind in Abbildung 5.34 für unterschiedliche Reduktionsfaktoren wiedergegeben. Trotz zunehmender Reduktion der Anzahl der Objekte ist durch die Typifizierung die zugrundeliegende Struktur immer noch sehr deutlich zu erkennen. Dies wird auch deutlich sichtbar, wenn die Objekte auf einen entsprechenden Maßstab verkleinert werden (Abbildung 5.35).

Das nächste Beispiel zeigt eine Situation, in der primär lineare Strukturen vorliegen (Abbildung 5.36), welche Häuserreihen darstellen. Die zufällige Reduktion auf 70% der Objekte führt zur Ausgangssituation links oben.

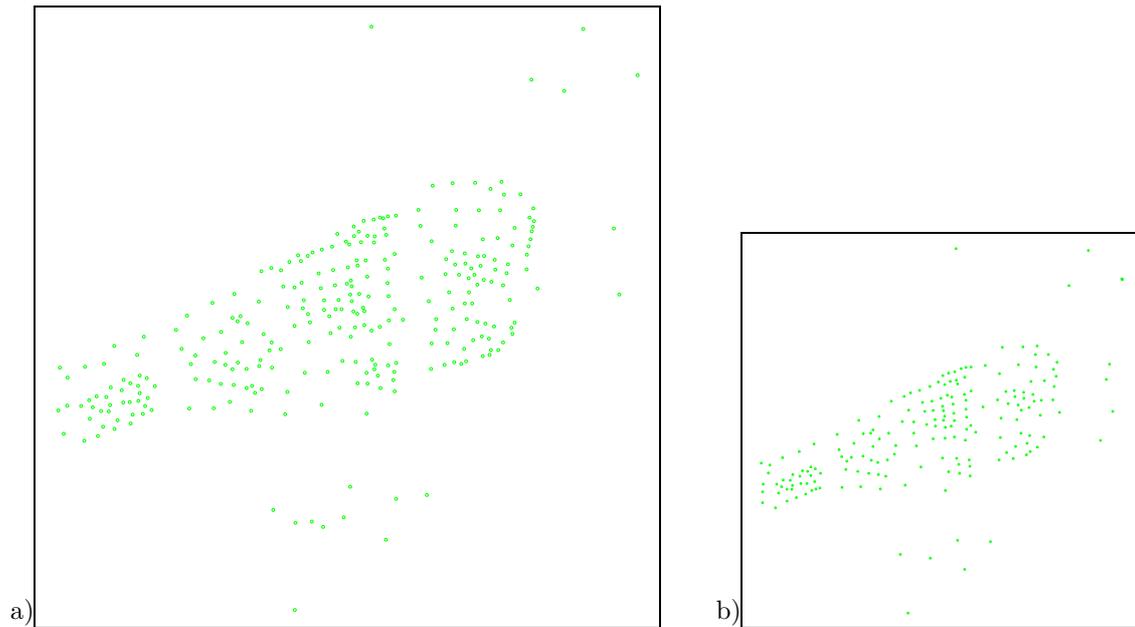


Abbildung 5.35: Diese Darstellung zeigt eine Repräsentation in einer entsprechenden Vergrößerung: Reduktion auf 30% (a), Reduktion auf 20% (b).

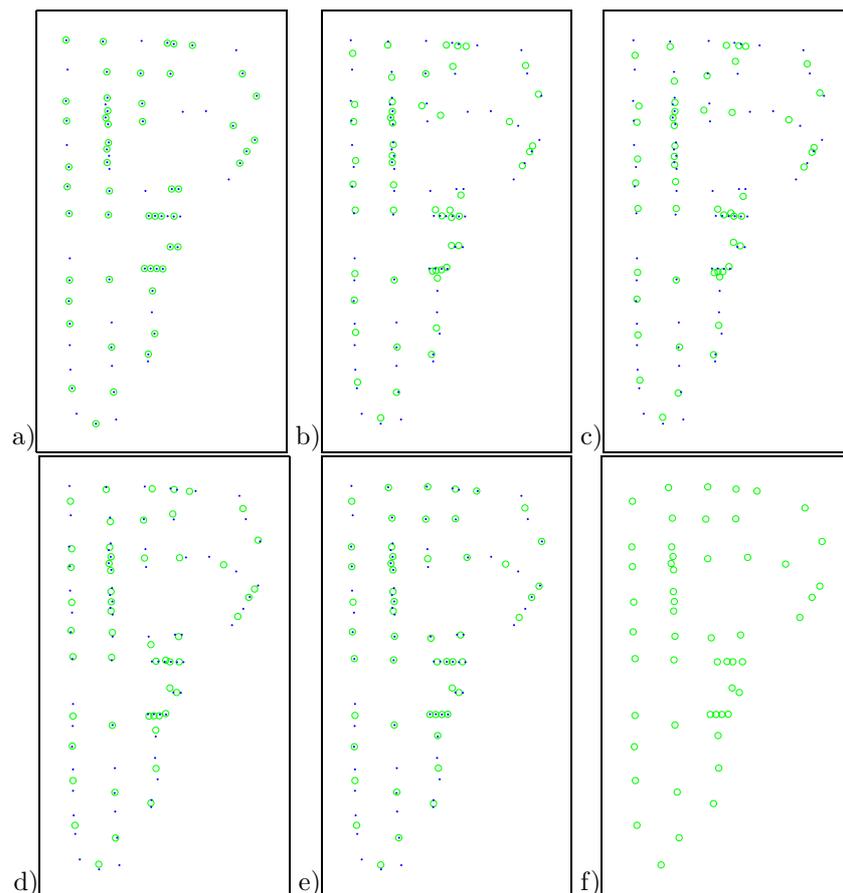


Abbildung 5.36: Reduktion des Gebäudebestandes von ausgeprägter linearer Struktur auf 70%: Originalsituation mit ausgewählten Neuronen (a); Darstellungen nach einigen Iterationen; Ergebnis der Typifizierung (f)).

Im Laufe der Iterationen passen sich die Neuronen an die Reize an, wobei sowohl die lineare Struktur als auch die unterschiedlichen Dichteverhältnisse sehr schön erhalten bleiben.

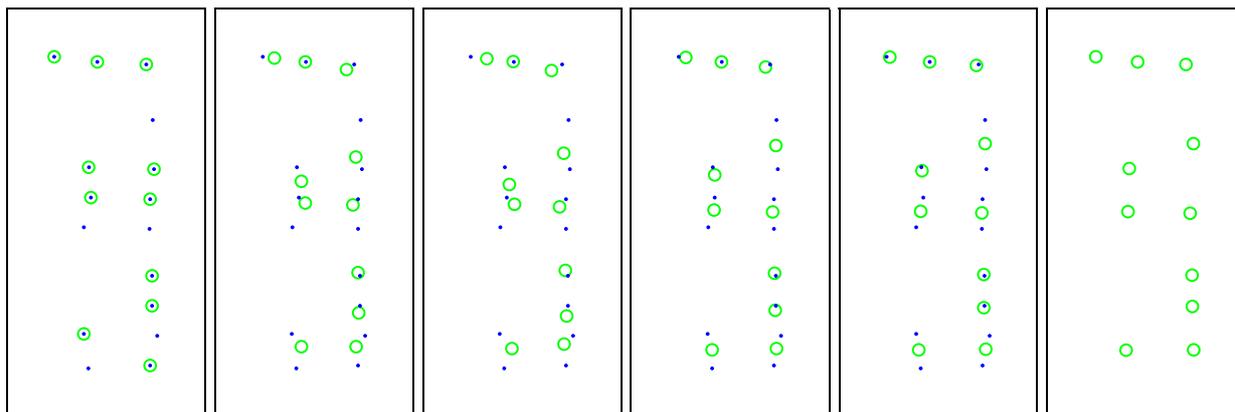


Abbildung 5.37: Reduktion des Situation aus Kapitel 5.4.1, Seite 79 (Reduktion auf 70%).

Das letzte Beispiel zeigt das Ergebnis der Anwendung des Verfahrens auf das Beispiel aus Kapitel 5.4.1, Seite 79. Das Ergebnis ist in Abbildung 5.37 dargestellt. Die räumliche Verteilung der Objekte – insbesondere die typischen linearen Strukturen, aber auch die Cluster innerhalb dieser Reihen – bleibt nach der Reduktion auf 70% deutlich erhalten.

5.4.2.5 Bewertung

Alle Beispiele wurden mit denselben Parametern berechnet: die Anzahl der Iterationen lag bei 50, die Lernrate η reduzierte sich mit der Anzahl der Epochen von 1 auf 0.001. Die Abstandsfunktion wurde wie oben angegeben mit der Gaussfunktion realisiert, wobei als Wert für σ der mittlere Abstand im Netz angenommen wurde. Die Tatsache, dass alle Berechnungen mit diesen Parametern möglich waren zeigt, dass diese Wahl für diese Art von Problemstellung relativ unkritisch ist. Die Netztopologie und ihre Gewichte ist in diesem Fall auch schon sehr genau vorgegeben – daher treten auch keine Faltungen ('Butterfly-Defekt') auf, wie sich in Anwendungen von selbstorganisierten Karten typischerweise auch auftreten können.

Es stellt sich heraus, dass die Kohonen Merkmalskarten sehr gut geeignet sind, räumliche Strukturen aufzudecken. Ihre Eigenschaft kommt dabei zum Tragen, dass sie sich an die vorgegebene Situation, die Reize, optimal räumlich anpassen. Im Gegensatz zu einer bloßen Ausdünnung, bleiben hier die Dichteverhältnisse der ursprünglichen Situation erhalten. Bemerkenswert ist bei diesem Ansatz, dass eine vorhergehende Strukturerkennung nicht nötig ist: Die zufällige Auswahl einer Teilmenge von Objekten bildet die Neuronen, welche sich auf die Reize anpassen. Durch die Fähigkeit der Kohonen Feature Maps, die Dichte der Eingangsreize zu approximieren, finden sich im Anschluss an das Training entsprechend mehr Neuronen in Gebieten mit vielen Reizen.

Bei stark regelmäßigen Strukturen kann es allerdings vorkommen, dass diese Regelmäßigkeit verloren gehen kann: werden in einem regelmäßigen Raster zufällig Objekte entfernt, so platzieren sich die Neuronen anschließend genau dazwischen, in die Lücken (siehe auch Abbildung 5.32). Dies bedeutet, dass beispielsweise ein Quadrat von 4×4 Gebäuden bei einer Reduktion auf 9 Gebäude sich nicht garantiert in der gewünschten Art einer 3×3 -Anordnung darstellt. Dies wird nur dann erreicht, wenn eine 3×3 -Topologie im Kartenraum vorgegeben wird, was durch das zufällige Selektieren der Neuronen, nicht garantiert werden kann. Die direkte Vorgabe dieser Topologie setzt eine Strukturerkennung voraus, welche diese spezielle Situation erkennt und die entsprechende Typisierung hierfür angibt.

Handelt es sich allerdings um ausgeprägte, separierte Reihen von Objekten, so werden auch diese größtenteils erhalten, wie in den Abbildungen 5.36 und 5.37 gezeigt wurde. Generell gilt, dass eine zufällige Objektanordnung, wie sie bei natürlichen Phänomenen üblicherweise vorliegt, mit diesem Verfahren sehr ansprechend generalisiert werden kann.

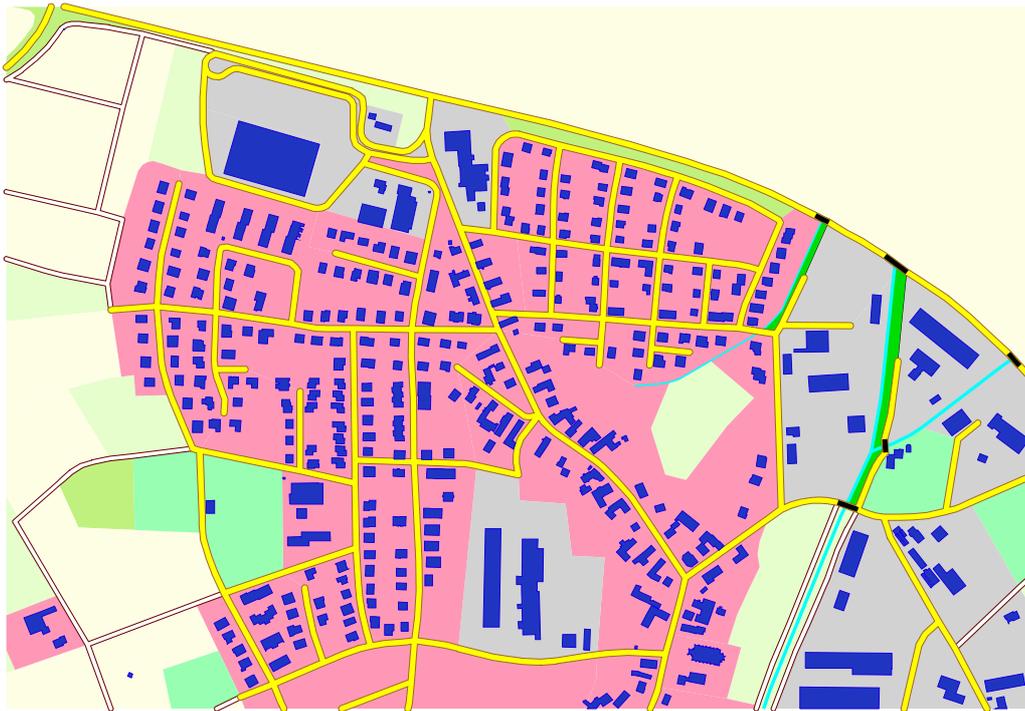


Abbildung 5.38: Reine geometrische Überlagerung der ALK-Gebäude über den ATKIS-Datenbestand; (Visualisierung in ArcView).

5.5 Anwendung: Integration von ALK-Gebäuden in einen ATKIS-Datenbestand

Die Integration von Datensätzen unterschiedlichen Maßstabs erfordert einige Voraussetzungen (vgl. Kapitel 4.1). Nach der semantischen Anpassung sind die Objekte geometrisch zu integrieren. Dazu müssen zunächst die Auflösungen der Objekte einander genähert angepasst werden, des weiteren gilt es, entstehende räumliche Konflikte zu lösen.

Als Beispiel soll die Integration von ALK-Gebäuden in ATKIS dienen. Diese ist dann wünschenswert, wenn es gilt, Information aus beiden Datenbeständen gleichzeitig zu verwenden. In ATKIS wird die Bebauung in Form von Siedlungsflächen beschrieben. Dennoch ist es mitunter hilfreich, auch Information über die einzelnen Gebäude, aus denen sich die Siedlung zusammensetzt, zu haben, etwa wenn es darum geht, eine kartenähnliche Darstellung von Objekten aus beiden Datensätzen zu erhalten. Für die Integration ist es wichtig, dass in diesem Falle unterschiedliche Objekttypen vorliegen, die in einer Aggregationshierarchie zueinander stehen: die Siedlungsflächen setzen sich aus bebauten Flurstücken zusammen. Für die geometrische Integration ist daher zu berücksichtigen, dass die Gebäude innerhalb der Siedlungsgebiete von ATKIS liegen, und insbesondere auch keine Konflikte mit anderen ATKIS-Objekten – speziell den Straßen – auftreten dürfen.

Mit den vorgestellten Methoden der Vereinfachung und Verdrängung ist eine automatische Integration von ALK Daten in ATKIS Datenbestände möglich. Dies lässt sich als Sequenz von den entwickelten, in diesem Kapitel beschriebenen Operatoren, realisieren. Abbildung 5.38 zeigt die 'Integration', die sich durch reine geometrische Überlagerung der beiden Datensätze ergibt.

Es entsteht ein recht unruhiger Eindruck, der besonders durch die komplexe Geometrie der Gebäude ausgelöst wird. Weiterhin sind die Abstände zwischen einzelnen Gebäuden, aber besonders auch zwischen den Gebäuden und den Straßen zum Teil zu gering, und führen somit dazu, dass sie visuell nicht wahrnehmbar sind.

In einem ersten Schritt sind daher die kleinstrukturierten Elemente der Gebäude zu vereinfachen, da diese im kleineren Maßstab nicht mehr als solche erkannt werden, und sie im Gegenteil den visuellen Eindruck stören. Dies wird erreicht, indem die Gebäude vereinfacht werden: als Steuerparameter dient hier der Wert 5m, d.h. Gebäudekanten die im Maßstab 1:25.000 kleiner als 0.2mm sind, werden ersetzt. Auf diese Weise entsteht die Darstellung in Abbildung 5.39, in der die Gebäude jetzt deutlich 'ruhiger' wirken.

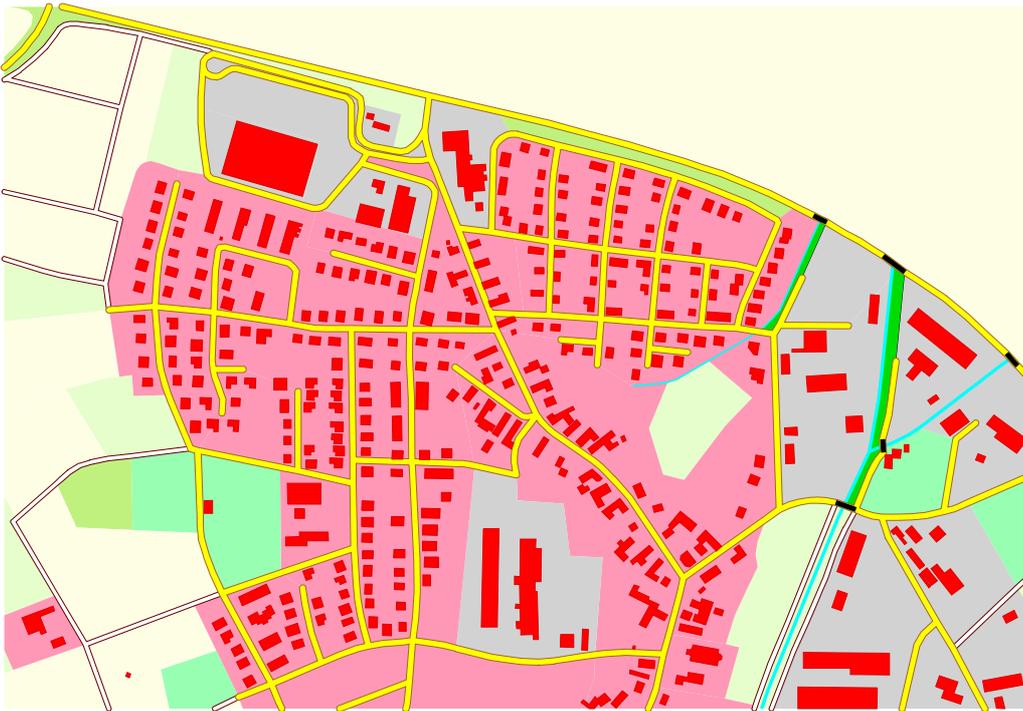


Abbildung 5.39: Vereinfachung der Gebäudegrundrisse.

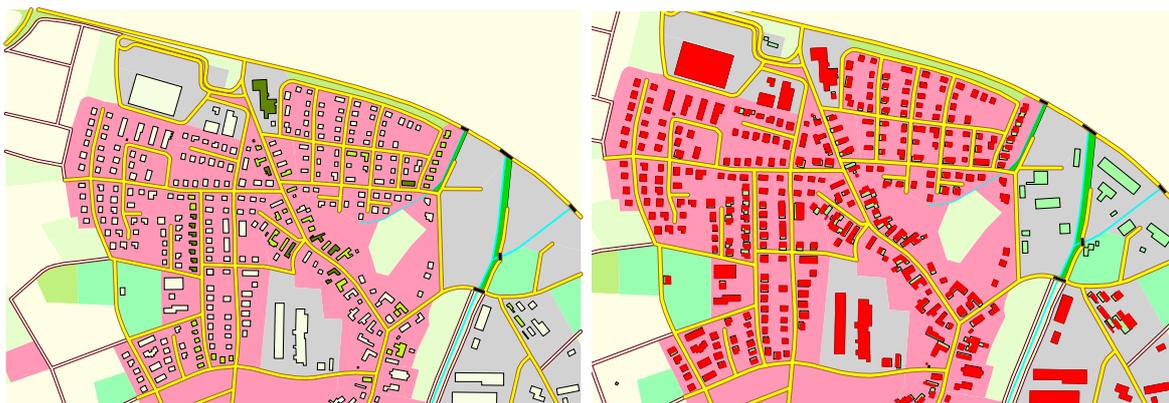


Abbildung 5.40: Visualisierung der Deformationswerte in den Gebäudeobjekten in verschiedenen Farben (links); Überlagerung der Situation vor und nach der Verdrängung (rechts).

Im folgenden Schritt müssen die räumlichen Konflikte beseitigt werden, indem die Objekte gegeneinander verdrängt werden. Da die Gebäude in den ATKIS-Datenbestand integriert werden, ist letzterer festzuhalten, d.h. das Straßennetz wird fest angenommen, während die Gebäude verschoben werden können.

Aufgrund der hohen Anzahl der Punkte würde ein sehr großes Gleichungssystem entstehen, was zu sehr langen Berechnungszeiten führen würde. Daher wurde das Gebiet in unabhängige Einheiten unterteilt, die sich separat verarbeiten lassen. Als Unterteilung bietet sich hier das Straßennetz an. Prinzipiell kann dieser Vorgang der Festlegung der Einheiten automatisch erfolgen: innerhalb des Straßennetzes wird nach geschlossenen Zyklen gesucht, welche dann die separat zu vereinfachenden Einheiten bilden. Diese Segmentierung wurde im vorliegenden Beispiel allerdings manuell durchgeführt. Abbildung 5.40, links, zeigt die Verschiebungen, indem die Situation vor und nach der Verdrängung überlagert dargestellt wird. Das Ergebnis der Verdrängung kann wiederum bezüglich der maximalen Deformationen analysiert werden. Abbildung 5.40, rechts, zeigt die Deformationen in den Gebäudeobjekten farblich kodiert: je dunkler, desto stärkere Deformationen liegen vor. Die Maximalwerte liegen bei etwa 2.7m. Die 'kritischen' Gebiete können direkt auf einen Blick identifiziert werden. Es steht es dem Operateur frei, das Ergebnis so zu akzeptieren, oder gegebenenfalls weitere Generalisierungsmaßnahmen

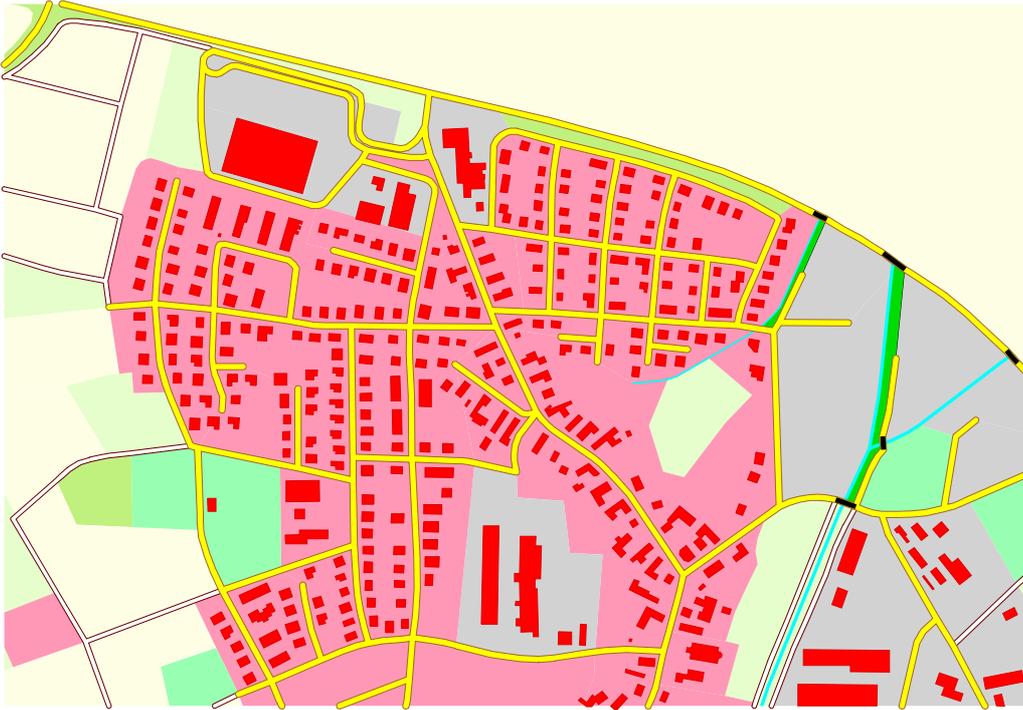


Abbildung 5.41: *Ergebnis der automatischen Datenintegration.*

zu treffen, um diese Konflikte zu beseitigen (z.B. Typisierung). Gleichmaßen können die Deformationswerte auch extrahiert werden und mit geeigneten Methoden (vgl. die Ansätze innerhalb des AGENT-Projekts, [Lamy et al. 1999]) automatisch weiterverarbeitet werden.

Insgesamt ergibt sich eine deutlich ruhigere Darstellung (Abbildung 5.41), bei der alle Objekte deutlich voneinander separiert sind und als getrennte Einheiten wahrgenommen werden können.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Ausblick auf eine mögliche Integration von GIS und Bildanalyse

Datenquellen für GIS haben stark unterschiedliche Charakteristika. Die Gemeinsamkeit liegt in der Repräsentation räumlicher Phänomene, die bei Bildern in Form von Grauwerten an diskreten Pixelpositionen, in GIS meist durch attributierte Vektorelemente beschrieben werden. Im GIS-Bereich wird sowohl die Geometrie als auch die Semantik explizit modelliert. In der Bildanalyse hingegen ist die Geometrie mit der Thematik implizit verbunden: die Geometrie ist durch das Raster beschrieben, während die Thematik in den Grauwerten gegeben ist. Die Ableitung von mehreren Repräsentationen eines Datenbestandes erfordert damit ganz unterschiedliche Techniken.

Die Integration dieser unterschiedlichen Repräsentationen ermöglicht, dass Datenquellen unterschiedlichen Typs und unterschiedlicher Herkunft miteinander verarbeitet und gemeinsam genutzt werden können, und sich somit gegenseitig ergänzen und bereichern können.

In der Arbeit wurden die unterschiedlichen Datenformen mit ihren zugehörigen Algorithmen zur Erzeugung von maßstabsabhängigen Darstellungen beschrieben und einander gegenübergestellt. Eine echte Integration kann nur auf Basis dieses Vergleichs der unterschiedlichen Charakteristika erfolgen. Diese Integration wird im Folgenden lediglich skizziert.

Mit der Integration ergeben sich folgende Möglichkeiten (vgl. auch Abbildung 6.1):

1. Ausführen von Algorithmen in der jeweils anderen Datenstruktur, in der sie effizienter lösbar sind, und Rücktransformation.
2. Gegenseitige Nutzung der Datenquellen.

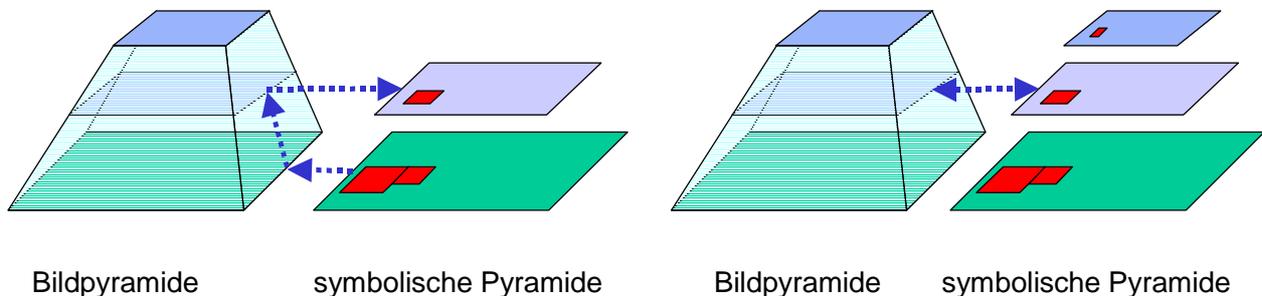


Abbildung 6.1: Mögliche Nutzung maßstabsabhängiger Darstellung in Bildpyramiden und symbolischer Repräsentation: Optimale Datenprozessierung (links); Gegenseitige Nutzung der Daten (rechts).

Zu 1: Die Idee liegt darin, dass Operationen gleichen Typs auf unterschiedlichen Datenbeständen unterschiedlich komplex sind. Beispielsweise lässt sich die Linienglättung mittels morphologischer Operationen sehr effizient – unabhängig von der Komplexität der Linie – lösen. Gleiches gilt für die Flächenverschneidung [Glemser, Klein, Fritsch & Strunz 2000], welche eine sehr elementare Operation im Rasterbereich ist, allerdings im Vektorbereich komplexe Operationen erfordert. Hier bietet es sich an, den Vektordatenbestand in die andere Repräsentationsform zu transformieren, dort zu verarbeiten und anschließend wieder zurückzutransformieren. Dies ist auch für die Ableitung kleiner Maßstabsunterschiede möglich, wo primär Glättungen auftreten: diese lassen sich im Rasterbereich durch einfache Tiefpassfilterung berechnen. Voraussetzung ist natürlich, dass effiziente Raster-Vektor-Konversionsprogramme vorliegen.

Zu 2: Hierunter fällt die GIS-gestützte Interpretation von Bildern. Voraussetzung ist, dass die GIS-Modelle derart aufbereitet und angereichert werden, dass sie optimal der Bildinformation entsprechen.

Grundsätzlich bestehen folgende Unterschiede zwischen ikonischer und symbolischer Beschreibung: ein Bild stellt ein (prinzipiell) nicht-selektives Abbild der Realität dar. Diese Definition wird insofern eingeschränkt, als bestimmte Sensoren (multi-spektral, hyperspektral) bestimmte Information eines Phänomens herausfiltern können. Grundsätzlich erfolgt aber keine explizite Selektion. Dies ist im GIS anders: jeder Datenerfassung im GIS geht eine Datenmodellierung voran, in welcher spezifiziert wird, welche Information erfasst wird, und wie diese repräsentiert wird. Daher erfolgt hier eine starke Selektion, welche von der speziellen zu behandelnden Thematik abhängt.

Um Bildanalyse und GIS näher zusammenzubringen, und somit die automatische GIS-Datenerfassung aus Bildern zu ermöglichen, müssen verschiedene Voraussetzungen geschaffen werden:

- ▷ Im GIS steht die Semantik der zu erfassenden Daten im Vordergrund, daher wird auch nur diese spezifiziert – relativ unabhängig von den visuellen Gegebenheiten. Die Erfassung läuft üblicherweise so ab, dass
 1. ein Operateur die entsprechende Datenerfassungsmethode und Datenquelle auswählt (z.B. Satellitenbild, Luftbild, geodätische Messung), in welcher die zu erfassenden Objekte messbar sind – was von der jeweiligen Bild- und Objektauflösung abhängt,
 2. der Operateur während der Erfassung lediglich die für ihn relevanten Objekte misst. Bei der ATKIS-Straßenerfassung ignoriert er beispielsweise die Mittelstreifen, die Fahrbahnbegrenzungen, sowie die Komplexität einer Kreuzung und digitalisiert lediglich die Mittelachse der Straße.

Wenn es nun darum geht, diesen Prozess zu automatisieren, so müssen verschiedene Gegebenheiten vorab geklärt werden, und deren Automatisierbarkeit geprüft werden.

1. Die Auswahl der geeigneten Datengrundlage muss automatisch – entsprechend dem zu erfassenden Objekt – erfolgen. Diese Datenquelle kann für verschiedene Objektarten einer Aufgabenstellung unterschiedlich sein. Beispielsweise eignet sich ein Satellitenbild für die Erfassung von Waldgebieten, während ein hochauflösendes Luftbild für die 3D-Messung von Gebäuden nötig ist.
 2. Die Messung muss automatisiert werden. Sie setzt zunächst die Identifikation der Objekte voraus und benötigt Modelle der zu erkennenden Objekte. Im Allgemeinen ist hierzu Kontextwissen und detaillierte Objekt-Information nötig [Mayer 1998a]. Ein GIS muss daher nicht nur die Information enthalten, die für die Anwendung ursprünglich spezifiziert wurde, sondern darüberhinaus noch Information, die für die Identifikation der Objekte nötig ist. Hiermit wird erreicht, dass ein sehr viel umfassenderes Abbild der realen Welt in einem GIS gespeichert wird, als dies bislang erfolgt ist. Damit eröffnen sich Wege, diese Daten auch für weitergehende Fragestellungen einzusetzen. Hierzu sind die GIS-Modelle näher an die physikalische Realität gerückt werden, d.h. auch bzw. mehr visuelle, funktionale bzw. physikalische Eigenschaften müssen in die Datenmodelle aufgenommen werden. Diese Anreicherung der Datenmodelle kann inkrementell im Laufe der Erfassung erfolgen. Denkbar ist, dass sich die Modelle in ihrer Reichhaltigkeit ständig erweitern – indem sukzessive Eigenschaften hinzugenommen werden, sobald neue Objekte erfasst werden. Diese Erweiterung kann prinzipiell durch Lernverfahren realisiert werden, indem die gefundenen neuen Objekteigenschaften aus der Bildanalyse automatisch übernommen werden.
- ▷ Die Korrespondenzen in den Maßstabsebenen müssen deutlich herausgestellt werden. Nur so kann die Auswahl eines für eine Fragestellung wichtigen Maßstabs, sowie eine hierarchische Datenanalyse erfolgen.

Für die Bestimmung der Korrespondenzen zwischen den Repräsentationsformen, ist es nötig, die Aggregationsprozeduren einander anzugleichen. Dies ist jedoch mitunter schwierig: Die Objekt-Hierarchie, die auf semantischer Ebene sinnvoll ist, muss sich nicht unbedingt auf ikonischer Ebene widerspiegeln. In vielen Fällen ist dies jedoch der Fall: so sind Mittel- und Seitenstreifen einer Straße in einer gröberen Auflösung (2m) nicht mehr sichtbar. Sind beispielsweise Straßen aus Luftbildern zu extrahieren, so wird auf eine detaillierte Beschreibung (incl. Fahrbahnen, Randstreifen, usw. (vgl. [de Gunst & Vosselman 1997])) zurückgegriffen, sind sie hingegen aus Satellitenbildern zu ermitteln, so muss eine Straße als linienförmiges Objekt modelliert sein. Diese verschiedenen Repräsentationen der Straße müssen bereitgestellt werden und möglichst automatisch für eine vorgegebene Auflösung abgeleitet werden.

Die Bereitstellung von Repräsentationen für unterschiedliche Auflösungen wurde von Bobick & Bolles [1989] vorgeschlagen (vgl. Kapitel 3.1.5). Ein Busch gilt dann als erkannt, wenn er sowohl einer einzelnen Maßstabsebene zugeordnet werden kann, aber auch das gleiche Verhalten im Maßstabsübergang aufweist. Dies ist eine wichtige Beobachtung, legt sie doch fest, dass das maßstabsabhängige Verhalten sehr gute Hinweise auf Objektidentität geben kann. Das Problem ist jedoch, die Modellinformation derart aufzubereiten, dass sie den maßstabsabhängigen Gegebenheiten genügt. Üblicherweise werden solche Beschreibungen von Hand aufgestellt, so von [Bobick & Bolles 1989] und von [Mayer 1998a].

Um diesen Vorgang zu automatisieren, ist es nötig, das maßstabsabhängige Verhalten der Bildobjekte (d.h. der abgebildeten Realobjekte) zu modellieren und in einer räumlichen Datenstruktur festzuhalten. Hierzu existieren mehrere Möglichkeiten: zum einen lassen sich die einzelnen Repräsentationen im Bild beobachten und messen und so in eine explizite Repräsentation überführen. Zum anderen eröffnet die automatische Generalisierung jedoch die Möglichkeit, eine maßstabsabhängige Darstellung automatisch aus einer hochgenauen Repräsentation abzuleiten. Dies ist mit den hier vorgestellten Verfahren in Ansätzen möglich. Das grundlegende Problem hierbei besteht jedoch in der Modellierung der begrifflichen Übergänge, welche nicht mehr kontinuierlich erklärt werden können: für die Beschreibung des Übergangs von einem Baum zu einem Wald ist eine neue Begriffsbildung erforderlich.

Die Möglichkeiten, die eine Integration unterschiedlicher Datenbestände in Aussicht stellt, erfordert noch große Forschungsanstrengungen. In den verschiedenen Disziplinen, die sich mit raumbezogenen Daten beschäftigen – u.a. GIS und Computer Vision – wird zunehmend deutlich, dass die schwierigen Probleme prinzipiell durch Nachbildung von Intelligenzleistungen des Menschen angegangen werden können. Deren Realisierung ist jedoch nicht trivial und bislang lediglich in Ansätzen durchgeführt. Es zeigt sich aber eine Konvergenz in den Forschungsbestrebungen in beiden Forschungsdisziplinen: Die komplexen Probleme sind nur durch Integration von Kontext lösbar. Das in beiden Disziplinen vorhandene Wissen, sowie die reichhaltigen Arsenale an Methoden und Werkzeugen müssen in geeigneter Weise zusammengeführt und kombiniert werden.

6.2 Zusammenfassung

Der Maßstab steht im Zentrum dieser Arbeit. Es wurde der Stand der Forschung dargestellt, welcher im Bereich der maßstabsabhängigen Darstellung räumlicher Objekte gegenwärtig zu beobachten ist.

Die momentane Situation kann dadurch charakterisiert werden, dass ein Stand erreicht ist, bei dem es gilt, menschliche Intelligenzleistungen zu realisieren. Es existiert eine Fülle von leistungsfähigen Operatoren, welche für unterschiedliche Fragestellungen eingesetzt werden können. Die Auswahl der Operationen für ein bestimmtes Problem obliegt bislang dem Menschen. Ist dies ein kartographischer Experte, so ist er sehr wohl in der Lage, diese Sammlung von Operatoren als 'Werkzeugkiste' zu betrachten, und die für das jeweilige Aufgabenziel richtigen herauszuwählen. Der kritische Punkt liegt jedoch in der Automation dieses Prozesses. Schon für semi-automatische Ansätze wäre es wünschenswert, dem Nutzer Unterstützung bei der Auswahl der Operatoren, und speziell ihrer Parameter zu gewährleisten. Für einen vollautomatischen Ablauf ist es nötig, die übergeordneten Zusammenhänge explizit zu machen, damit sie vom System genutzt werden können.

Es wurden Beispiele gezeigt, die in die Richtung gehen, globale und lokale Operatoren zu integrieren, indem eine übergeordnete Instanz die globale Kontrolle lokaler Operatoren übernimmt. Kritisch für solche Aufgaben sind Steuerparameter, die zum einen prüfen, wann ein Algorithmus einsetzbar ist; zum anderen ist es elementar wichtig, dass die Algorithmen über Methoden der automatischen Beurteilung verfügen: neben dem reinen Ergebnis ist die Ausgabe von Qualitätsparametern entscheidend. Diese erlauben, das Ergebnis sowohl visuell (z.B. in Form eines Ampel-Modells) als auch automatisch zu evaluieren. Diese Funktion der Selbstdiagnose und Beurteilung des Ergebnisses ist das entscheidende Kriterium für jede Automatisierungsaufgabe. In diesem Zusammenhang sind die entwickelten Algorithmen zu sehen, die als Bausteine für ein integriertes System genutzt werden können.

A Optimierungsverfahren

Optimierungsverfahren werden generell dann eingesetzt, wenn eine Menge von Variablen derart bestimmt werden sollen, dass ein gewünschtes Ziel auf optimalem Wege erreicht wird. Typischerweise existieren Restriktionen zwischen den Variablen, die als Bedingungen formuliert werden. In der Literatur finden sich verschiedene Verfahren der mathematischen Optimierung, die unterschiedliche Problemstellungen behandeln [Grafarend, Heister, Kelm, Kropff & Schaffrin 1979]. In der Geodäsie ist die quadratische Optimierung in Form der Kleinste-Quadrate-Ausgleichung sehr verbreitet. Im Bereich des Operations Research werden oft lineare Optimierungsmethoden eingesetzt. Dort existieren leistungsfähige Verfahren, um lineare Zusammenhänge zwischen den Beobachtungen und Nebenbedingungen mit zusätzlichen Restriktionen zu lösen.

A.1 Lineare Optimierung

Der Grundtyp der linearen Optimierung stellt sich dabei folgendermaßen dar: eine Zielfunktion ist in Abhängigkeit der Variablen zu minimieren, gleichzeitig gelten Nebenbedingungen und zusätzliche Restriktionen bezüglich der Variablen:

$$\begin{aligned} \mathbf{z} = \mathbf{d}^T \mathbf{x} & \stackrel{!}{=} \min \\ \mathbf{Ax} & = \mathbf{b} \\ \mathbf{x} & \geq \mathbf{0} \end{aligned}$$

Dieser Grundtyp lässt sich abwandeln zu einer in eine Maximierungsaufgabe, indem die negative Zielfunktion minimiert wird. Die weitere Abwandlung betrifft die Möglichkeit, Ungleichungen in den Nebenbedingungen einzuführen:

$$\mathbf{Ax} \leq \mathbf{b}$$

Zur Lösung wird ein Hilfsvektor (die sog. Schlupfvariable) \mathbf{y} eingeführt, derart, dass gilt

$$\mathbf{Ax} + \mathbf{y} = \mathbf{b}$$

wobei die Vorzeichenbedingung gelten muss:

$$\mathbf{y} \geq \mathbf{0}.$$

Auf diese Weise werden neue Variablen eingeführt, für die jeweils eine Vorzeichenbedingung gelten muss. Durch Erweitern des ursprünglichen unbekanntem Parametervektors \mathbf{x} um die weiteren Unbekannten \mathbf{y} , sowie der Matrix \mathbf{A} um eine Einheitsmatrix der Dimension m (m ist die Anzahl der Nebenbedingungen):

$$\tilde{\mathbf{x}} = \begin{pmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{y} \end{pmatrix}, \tilde{\mathbf{d}} = \begin{pmatrix} \mathbf{d} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix},$$

und

$$\tilde{\mathbf{A}} = [\mathbf{A}, \mathbf{E}_m] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

kann das System auf den Grundtyp zurückgeführt werden:

$$\begin{aligned} z(\tilde{\mathbf{x}}) &= \tilde{\mathbf{d}}^T \tilde{\mathbf{x}} \stackrel{!}{=} \min \\ \tilde{\mathbf{A}} \tilde{\mathbf{x}} &= \mathbf{b} \\ \tilde{\mathbf{x}} &\geq \mathbf{0} \end{aligned}$$

Diese Aufgabe lässt sich mit dem Simplex-Algorithmus lösen.

A.2 Quadratische Optimierung

Für die Lösung von quadratischen Optimierungsproblemen existiert die von Gauß entwickelte Methode der kleinsten Quadrate. In der Geodäsie wird diese eingesetzt, um aus gemessenen Beobachtungen unbekannte Parameter zu schätzen. Ziel ist es dabei, insbesondere den Einfluss der durch Messfehler beeinflussten Beobachtungen zu bestimmen. Werden die gesuchten Größen direkt gemessen, und gelten zwischen ihnen bestimmte Bedingungen, so setzt man die *Ausgleichung der bedingten Beobachtungen* an; besteht zwischen den Unbekannten und den Beobachtungen ein funktionaler Zusammenhang, so findet die Methode der *vermittelnden Ausgleichung* Einsatz.

Bei der Methode der vermittelnden Beobachtungen wird eine Beobachtung als Funktion der unbekannt, gesuchten Größen angesetzt. Weiterhin ist die Genauigkeitssituation der Beobachtungen gegeben.

$$l_i = f_i(\mathbf{x}); \sigma_i$$

Liegen nun mehr Beobachtungen vor als Unbekannte zu bestimmen sind, so spricht man von Überbestimmung. Aufgrund der Messfehler ist es nicht mehr möglich, ein eindeutiges Ergebnis zu erhalten. Ziel der Ausgleichung ist es, eine optimale Lösung zu finden, die der Zielfunktion genügt, so dass die Zuschläge zu den Beobachtungen (die sog. Verbesserungen v), möglichst minimal sind. Diese Bedingung kann auf verschiedene Arten formuliert werden. Die Forderung der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt

$$\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v} \stackrel{!}{=} \min$$

Dabei ist \mathbf{P} die Gewichtsmatrix der Beobachtungen. Damit geht ein, dass genaue Beobachtungen ein hohes Gewicht erhalten, und damit stärker an der Bestimmung der Unbekannten beteiligt sind als Beobachtungen mit kleinem Gewicht.

Die üblicherweise nichtlinearen Beobachtungsgleichungen (Normalgleichungen) werden linearisiert, indem eine Taylor-Entwicklung der Funktion durchgeführt wird, die man nach dem ersten Glied abbricht. Dies ist möglich, wenn gute Näherungen angesetzt werden. Die Ableitung $\frac{\partial f}{\partial x}$ wird in der Jacobimatrix \mathbf{A} beschrieben.

$$f(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}_0) + \mathbf{A} \Delta \mathbf{x}$$

Die Zuschläge zu den Unbekannten ergeben sich dann daraus:

$$\Delta \mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} (\mathbf{l} - \mathbf{f}(\mathbf{x}_0))$$

Dieses Gleichungssystem wird iterativ gelöst, so lange, bis die Zuschläge minimal werden. Mit den Verbesserungen kann der mittlere Fehler der Gewichtseinheit nach der Ausgleichung berechnet werden:

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v}}{n - u}}$$

wobei n die Anzahl der Beobachtungen und u die Anzahl der Unbekannten angibt.

A.3 Quadratische Optimierung mit Ungleichungen

Zur Bearbeitung des Problems der quadratischen Optimierung mit Ungleichungen existieren Lösungen, z.B. der sog. Non-Negative Least Squares-Algorithmus bzw. das LDP-Verfahren (Least Distance Programming). Hiermit werden Probleme folgender Form gelöst:

$$\begin{aligned} \mathbf{y} &= \mathbf{A}\mathbf{x} \\ \mathbf{G}\mathbf{x} &\geq \mathbf{H} \end{aligned}$$

Eine weitere elegante Lösungsmöglichkeit bietet der Lineare Komplementaritätsalgorithmus (LCA) (Für eine eingehende Beschreibung siehe [Fritsch 1985]). Generell wird hier von der folgenden allgemeinen Problemstellung ausgegangen:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x}} &:= \frac{1}{2}\mathbf{x}'\mathbf{Q}\mathbf{x} + \mathbf{c}'\mathbf{x} + \gamma \\ \mathbf{H}\mathbf{x} &\leq \mu_0 \\ \mathbf{x} &\geq \mathbf{0} \end{aligned}$$

Die Ungleichungen können in folgende Form gebracht werden:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H} \\ -\mathbf{I} \end{bmatrix} \mathbf{x} \leq \begin{bmatrix} \mu_0 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

Durch Einführung der Vektoren von Schlupfvariablen

$$\begin{aligned} \mathbf{t} &:= |t_1^2, t_2^2, t_3^2, \dots, t_r^2| \\ \mathbf{u} &:= |u_1^2, u_2^2, u_3^2, \dots, u_r^2| \end{aligned}$$

sowie der Vektoren der Lagrange'schen Multiplikatoren \mathbf{v}, \mathbf{w} kann die Lagrange-Funktion folgendermaßen formuliert werden:

$$L(\mathbf{x}, \mathbf{t}, \mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w}) := \frac{1}{2}\mathbf{x}'\mathbf{Q}\mathbf{x} + \mathbf{c}'\mathbf{x} + \gamma + \mathbf{v}'(\mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{t} - \mu_0) + \mathbf{w}'(-\mathbf{x} + \mathbf{u})$$

Diese Funktion wird minimiert, indem folgende partiellen Ableitungen zu Null gesetzt werden:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \mathbf{x}} &:= \mathbf{Q}\bar{\mathbf{x}} + \mathbf{c} + \mathbf{H}'\tilde{\mathbf{v}} - \tilde{\mathbf{w}} = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \mathbf{v}} &:= \mathbf{H}\bar{\mathbf{x}} + \tilde{\mathbf{t}} - \eta_0 = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \mathbf{w}} &:= -\bar{\mathbf{x}} + \tilde{\mathbf{u}} = 0 \Rightarrow \bar{\mathbf{x}} \geq \mathbf{0} \\ \frac{\partial L}{\partial \mathbf{t}} &:= 2\tilde{\mathbf{v}}_i \tilde{\mathbf{t}}_i = 0 \quad \forall i = 1, 2, \dots, r \quad \Rightarrow \tilde{\mathbf{v}}'\tilde{\mathbf{t}} = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \mathbf{u}} &:= 2\tilde{\mathbf{w}}_i \tilde{\mathbf{u}}_i = 0 \quad \forall i = 1, 2, \dots, r \quad \Rightarrow \tilde{\mathbf{w}}'\tilde{\mathbf{x}} = 0 \end{aligned}$$

Diese Bedingungen werden auch als Kuhn-Tucker-Bedingungen bezeichnet.

Als zusätzliche Bedingungen für die Lagrange-Multiplikatoren wird eingeführt:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L_{\alpha, \beta}}{\partial(\alpha k)} \Big|_{\alpha=0} &= \tilde{v} \geq 0 \\ \frac{\partial L_{\alpha, \beta}}{\partial(\beta k)} \Big|_{\beta=0} &= \tilde{w} \geq 0 \end{aligned}$$

Durch entsprechende Substitutionen [Fritsch 1985] kann das Problem schließlich in folgender Form formuliert werden:

$$\begin{array}{ll} \text{bestimme} & \tilde{\mathbf{v}}, \tilde{\boldsymbol{\lambda}} \geq \mathbf{0} \\ \text{so dass gilt} & \tilde{\mathbf{v}} = \mathbf{M}\tilde{\boldsymbol{\lambda}} + \mathbf{q} \\ & \tilde{\mathbf{v}}'\tilde{\boldsymbol{\lambda}} = \mathbf{0} \end{array}$$

Die als 'Lineares Komplementaritätsproblem bekannte Aufgabenstellung kann mit LCA aufgelöst werden (z.B. nach [Lemke 1968] oder [Cottle & Dantzig 1968]).

In der Arbeit wurde das Programmpaket LDP [Lawson & Hanson 1974] eingesetzt.

Literatur

- Ackermann, F. & Hahn, M. [1991], Image Pyramids for Digital Photogrammetry, *in*: H. Ebner, D. Fritsch & C. Heipke, Hrsg., 'Digital Photogrammetric Systems', Wichmann Verlag, München, Seiten 43–58.
- Aho, A., Hopcroft, J. E. & Ullman, J. D. [1983], *Data Structures and Algorithms*, Addison-Wesley, London.
- Aichholzer, O. & Aurenhammer, F. [1995], 'A novel type of skeleton for polygons', *Journal of Universal Computer Science* **1**(12), 752–761.
- Airault, S., Ruskone, R. & Jamet, O. [1994], Road detection from aerial images: a cooperation between local and global methods, *in*: 'Image and Signal Processing for Remote Sensing, Proc. SPIE 2315', Seiten 508–518.
- Amtlich Topographisches-Kartographisches Informationssystem (ATKIS)* [1988], Arbeitsgemeinschaft der Länder der Vermessungsverwaltungen der Bundesrepublik Deutschland (AdV), Bonn.
- Anders, K.-H. & Sester, M. [1997], Methods of Data Base Interpretation - Applied to Model Generalization from Large to Medium Scale, *in*: W. Förstner & L. Plümer, Hrsg., 'SMATI '97: Semantic Modelling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps', Birkhäuser, Basel, Seiten 89–103.
- Anders, K.-H. & Sester, M. [2000], Parameter-Free Cluster Detection in Spatial Databases and its Application to Typification, *in*: 'IAPRS', Vol. 33, ISPRS, Amsterdam, Holland.
- Anders, K.-H., Sester, M. & Fritsch, D. [1999], Analysis of Settlement Structures by Graph-Based Clustering, *in*: W. Förstner, C.-E. Liedtke & J. Bückner, Hrsg., 'SMATI 99: Semantic Modelling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps', Munich, Germany, Seiten 41–49.
- Badard, T. [1999], On the automatic retrieval of updates in geographic databases based on geographic data matching tools, *in*: 'Proceedings of the 19th International Cartographic Conference of the ICA', Ottawa, Canada.
- Badard, T. & Lemarie, C. [1999], Propagating updates between geographic databases with different scales, *in*: P. Atkinson & D. Martin, Hrsg., 'Innovations in GIS VII: GeoComputation', Taylor & Francis, London. to be published.
- Barrett, R., Ramsay, A. & Sloman, A. [1985], *POP-11, A Practical Language for Artificial Intelligence*, Ellis Horwood Ltd., Chichester, West Sussex, England.
- Bartelme, N. [1995], *Geoinformatik*, Springer.
- Bayer, H. [1995], Über die Anwendung selbstorganisierender Karten, Doktorarbeit, Universität Stuttgart, Institut für parallele und verteilte Höchstleistungsrechner.
- Bergholm, F. [1987], 'Edge Focussing', *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*.
- Bertin, J. [1974], *Graphische Semiologie – Diagramme, Netze, Karten*, Walter de Gruyter, Berlin, New York.
- Beurden, A. V. & Douven, W. [1999], 'Aggregation issues of spatial information in environmental research', *International Journal of Geographical Information Science* **13**(5), 513–527.
- Bian, L. [1997], *Multiscale Nature of Spatial Data in Scaling Up Environmental Models*, in Quattrochi & Goodchild [1997], Seiten 13–26.
- Bill, R. & Fritsch, D. [1991], *Grundlagen der Geo-Informationssysteme: Hardware, Software und Daten*, Wichmann, Karlsruhe.
- Blaser, A., Sester, M. & Egenhofer, M. [2000], 'Visualization in an early stage of the problem solving process in GIS', *Computers and Geosciences*.
- Bobick, A. & Bolles, R. [1989], Representation Space: An Approach to the Integration of Visual Information, *in*: 'Proceedings of the CVPR 1989', Seiten 492–499.

- Bobrich, J. [1996], *Ein neuer Ansatz zur kartographischen Verdrängung auf der Grundlage eines mechanischen Federmodells*, Vol. C455, Deutsche Geodätische Kommission, München.
- Brassel, K. & Weibel, R. [1988], 'A review and conceptual framework of automated map generalization', *International Journal of Geographical Information Systems* **2**(3), 229–244.
- Bregt, A. & Bulens, J. [1996], Application-oriented generalization of area objects, *in* Molenaar [1996b], Seiten 57–64.
- Brenner, C. [1994], Untersuchungen von Beurteilungskriterien und Gütemaßen für Kohonen feature maps und LVQ, Diplomarbeit, Institut für Parallele und Verteilte Höchstleistungsrechner (IPVR), Universität Stuttgart.
- Brenner, C. [2000], Towards fully automatic generation of city models, *in*: 'IAPRS', Vol. 33, ISPRS, Amsterdam, Holland.
- Bückner, J., Koch, H. & Pakzad, K. [1999], Knowledge Based Interpretation of Objects in Topographic Maps and Moorlands in Aerial Images, *in*: W. Förstner, C.-E. Liedtke & J. Bückner, Hrsg., 'SMATI 99: Semantic Modelling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps', Munich, Germany, Seiten 25–38.
- Bundy, G., Jones, C. & Furse, E. [1995], *Holistic generalization of large-scale cartographic data*, *in* Müller, Lagrange & Weibel [1995], Seiten 106–119.
- Burghardt, D. & Meier, S. [1997a], Cartographic Displacement Using the Snakes Concept, *in*: W. Förstner & L. Plümer, Hrsg., 'SMATI '97: Semantic Modelling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps', Birkhäuser, Basel, Seiten 114–120.
- Burghardt, D. & Meier, S. [1997b], 'Kartographische Verdrängung nach Extremalprinzipien', *Zeitschrift für Vermessungswesen* **122**(8), 377–386.
- Buttenfield, B. [1995], *Object-oriented map generalization: modelling and cartographic considerations*, *in* Müller, Lagrange & Weibel [1995], Seiten 91–105.
- Buttenfield, B. & DeLotto, J. [1989], Multiple Representations – Scientific Report for the Specialist Meeting of the National Center for Geographic Information and Analysis (NCGIA) Research Initiative 3, Technical Report 89-3, Department of Geography, New York.
- Buttenfield, B. & McMaster, R., Hrsg. [1991], *Map Generalization: Making rules for knowledge representation*, Longman.
- Cao, C. & Lam, N. S.-N. [1997], *Understanding the Scale and Resolution Effects in Remote Sensing and GIS*, *in* Quattrochi & Goodchild [1997], Seiten 57–72.
- Cianpalini, A., Cignoni, P., Montani, C. & Scopigno, R. [1997], 'Multiresolution Decimation based on Global Error', *The Visual Computer* **13**, 5.
- Cottle, R. & Dantzig, G. B. [1968], 'Complementary Pivot Theory of Mathematical Programming', *Lin. Alg. Applications* **1**, 103–125.
- de Berg, M., van Kreveld, M., Overmars, M. & Schwarzkopf, O. [2000], *Computational Geometry – Algorithms and Applications*, 2 edn, Springer, Heidelberg.
- de Gunst, M. & Vosselman, G. [1997], A Semantic Road Model for Aerial Image Interpretation, *in*: W. Förstner & L. Plümer, Hrsg., 'SMATI '97: Semantic Modelling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps', Birkhäuser, Seiten 107–122.
- DeFloriani, L. & Magillo, P. [1997], 'Visibility Computations on Hierarchical Triangulated Terrain Models', *GeoInformatica* **1**(3), 219–250.
- DeFloriani, L. & Puppo, E. [1995], 'Hierarchical Triangulation for Multiresolution Surface Description', *ACM Transactions on Graphics* **14**(4), 363–411.

- Devogele, T., Parent, C. & Spaccapietra, S. [1998], 'On spatial database integration', *International Journal of Geographical Information Science* **12**(4), 335–352.
- Devogele, T., Trevisan, J. & Raynal, L. [1996], Building a Multi-Scale Database with Scale-Transition Relationships, in Kraak & Molenaar [1996], Seiten 6.19–6.33.
- Dorffner, G. [1991], *Konnektionismus – Von neuronalen Netzwerken zu einer 'natürlichen' KI*, Leitfäden der angewandten Informatik, Teubner, Stuttgart.
- Doucette, P., Agouris, P., Musavi, M. & Stefanidis, A. [1999], Automatic Extraction of Linear Features from Aerial Imagery Using Kohonen Learning and GIS Data, in: 'Integrated Spatial Databases – Digital Images and GIS, International Workshop ISD'99', Portland, Maine, USA, Seiten 20–33.
- Douglas, D. & Peucker, T. [1973], 'Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature', *The Canadian Cartographer* **10**(2), 112–122.
- Dunkars, M. [1998], Object Oriented Modelling for Generalization of Geographic Information, Technical report, <http://www.hig.se/t-inst/sb/forsk/matsdunkars/matsdunkars.htm>, Sweden.
- Egenhofer, M., Clementini, E. & Felice, P. D. [1994], Evaluating Inconsistencies among Multiple Representations, in Waugh & Healey [1994], Seiten 901–920.
- Endrullis, M. [1988], 'Zur rechentechnischen Lösung von Verdrängungsproblemen in allgemein-geographischen Karten', *Vermessungstechnik* **36**(10), 344–345.
- Fayyad, U., Piatetsky-Shapiro, G., Smyth, P. & Uthurusamy, R., Hrsg. [1996], *Advances in Knowledge Discovery and Data Mining*, AAAI/MIT, Menlo Park, CA.
- Fischer, A., Kolbe, T. H. & Lang, F. [1999], On the Use of Geometric and Semantic Models for Component-Based Building Reconstruction, in: W. Förstner, C.-E. Liedtke & J. Bückner, Hrsg., 'SMATI 99: Semantic Modelling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps', Munich, Germany, Seiten 101–119.
- Fischer, J. [2000], Untersuchungen zur Multispektralklassifikation mittels Multi-Skalen- und Hierarchischen Ansätzen, Diplomarbeit, ifp-Diplomarbeit, unveröffentlicht.
- Freksa, C. [1999], Spatial Aspects of Task-Specific Wayfinding Maps – A representation-theoretic perspective, in: J. Gero & B. Tversky, Hrsg., 'Visual and Spatial Reasoning in Design '99', Massachusetts.
- Fritsch, D. [1985], Some Additional Information on the Capacity of the Linear Complementary Algorithm, in: E. Grafarend & F. Sanso, Hrsg., 'Optimization and Design of Geodetic Networks', Springer, Berlin, Seiten 169–184.
- Fritsch, D. [1995], Introduction to digital aerotriangulation, in: D. Fritsch & D. Hobbie, Hrsg., 'Photogrammetric Week '95', Wichmann Verlag, Heidelberg, Seiten 165–171.
- Fritsch, D. [1999], Virtual Cities and Landscape Models – what has Photogrammetry to offer ?, in: D. Fritsch & R. Spiller, Hrsg., 'Photogrammetric Week '99', Wichmann Verlag, Heidelberg, Germany, Seiten 3–14.
- Fritz, L. [1995], Recent Developments for Optical Earth Observation in the United States, in: D. Fritsch & D. Hobbie, Hrsg., 'Photogrammetric Week '95', Wichmann Verlag, Heidelberg, Seiten 75–83.
- Förstner, W. & Gülch, E. [1987], A Fast Operator for Detection and Precise Location of Distinct Points, Corners and Centers of Circular Features, in: 'Proc. ISPRS Intercommission Workshop on 'Fast Processing of Photogrammetric Data'', Interlaken.
- Fucke, Kirch & Nickel [1989], *Darstellende Geometrie*, Harri Deutsch Verlag.
- Gabay, Y. [1997], Untersuchungen zur maßstabsabhängigen Darstellung am Beispiel der Datensätze ALK und ATKIS, unveröffentlichtes Projekt am Institut für Photogrammetrie.

- Gabay, Y. & Doytsher, Y. [1995], Automatic Feature correction in Mergin Line Maps, *in*: '1995 ACSM/ASPRS Annual Convention & Exposition Technical Papers - Charlotte, North Carolina', Vol. 2, Seiten 404–411.
- Glemser, M., Klein, U., Fritsch, D. & Strunz, G. [2000], 'Complex Analysis Methods in Hybrid GIS Using Uncertain Data', *GIS - Geo-Informationssysteme* **13**(2), 34–40.
- Glover, E. & Mackaness, W. [1999], Dynamic Generalization from Single Detailed Database to Support Web Based Interaction, *in*: 'Proceedings of the 19th International Cartographic Conference of the ICA', Ottawa, Canada.
- Gottschalk, H.-J. [1972], 'Ein Modell zur automatischen Durchführung der Verdrängung bei der Generalisierung', *Nachrichten aus dem Karten- und Vermessungswesen* **I**(58), 21–25.
- Gottschalk, H.-J. [1973], 'Die automatische Ableitung einer Siedlungsdarstellung im Maßstab 1:200.000 aus im Maßstab 1:50.000 digitalisierten Flächen und Einzelhäusern', *Nachrichten aus dem Karten- und Vermessungswesen* **61**, 19–29.
- Grafarend, E., Heister, H., Kelm, R., Kropff, H. & Schaffrin, B. [1979], *Optimierung geodätischer Meßoperationen*, Wichmann, Karlsruhe.
- Grünreich, D. [1992], 'Welche Rolle spielt die Kartographie beim Aufbau und Einsatz von Geo-Informationssystemen?', *Kartographische Nachrichten* **42**(1), 1–6.
- Grünreich, D. [1995], *Development of Computer-Assisted Generalization on the Basis of Cartographic Model Theory*, in Müller, Lagrange & Weibel [1995], Seiten 47–55.
- Grün, A., Baltsavias, M. & Henricsson, O., Hrsg. [1997], *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (II)*, Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Berlin.
- Grün, A., Kübler, O. & Agouris, P., Hrsg. [1995], *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images*, Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Berlin.
- Haala, N. & Brenner, C. [1999], 'Virtual City Models from Laser Altimeter and 2D Map Data', *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **65**(7), 787–795.
- Hahn, M. & Stätter, C. [1998], A Scene Labelling Strategy for Terrain Feature Extraction using Multisource Data, *in*: T. Schenk & A. Habib, Hrsg., 'IAPRS', Vol. 32/3, ISPRS Commission III Symposium on Object Recognition and Scene Classification from Multispectral and Multisensor Pixels, Columbus/Ohio, USA, Seiten 435–441.
- Hahn, M., Kiefner, M., Quednau, A. & Hinz, E. [1996], Semi-Automatic Measurement of Signalized Ground Control Points at Digital Photogrammetric Workstations, *in*: 'International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing', Vol. 31/3, ISPRS, Vienna, Austria, Seiten 291–296.
- Hake, G. & Grünreich, D. [1994], *Kartographie*, Gruyter.
- Hangouet, J.-F. & Lamy, S. [1999], Automated Cartographic Generalization: Approach and Methods, *in*: 'Proceedings of the 19th International Cartographic Conference of the ICA', Ottawa, Canada.
- Haralick, R. & Shapiro, L. [1993], *Computer and Robot Vision*, Vol. II, Addison-Wesley.
- Harrie, L. E. [1998], 'Generalization methods for propagation updates between cartographic data sets', *Licentiate Thesis*.
- Harrie, L. E. [1999], 'The constraint method for solving spatial conflicts in cartographic generalization', *Cartography and Geographic Information Science* **26**(1), 55–69.
- Harrie, L. & Hellström, A.-K. [1999], A Case Study of Propagating Updates between Cartographic Data Sets, *in*: 'Proceedings of the 19th International Cartographic Conference of the ICA', Ottawa, Canada.
- Heikkilä, J. [1989], 'Multiscale Representation with Förstner Operator', *The Photogrammetric Journal of Finland*.

- Heipke, C. [1995], *Digitale Photogrammetrische Arbeitsstationen*, Vol. 450 of *Reihe C*, Deutsche Geodätische Kommission, Technische Universität München.
- Hinz, S., Baumgartner, A., Steger, C., Mayer, H., Eckstein, W., Ebner, H. & Radig, B. [1999], Road Extraction in Rural and Urban Areas, *in*: W. Förstner, C.-E. Liedtke & J. Bückner, Hrsg., 'SMATI 99: Semantic Modelling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps', Munich, Germany, Seiten 133–153.
- Hoffmann, F. [1976], 'Kartographische Erkenntnismethode als Gegenstand der Theoretischen Kartographie', *Vermessungstechnik* **24**(11), 116–117. Besprechung einer russischen Arbeit.
- Hojholt, P. [1998], Solving Local and Global Space Conflicts in Map Generalization Using a Finite Element Method Adapted from Structural Mechanics, *in*: T. Poiker & N. Chrisman, Hrsg., 'Proceedings of the 8th International Symposium on Spatial Data handling', Vancouver, Canada, Seiten 679–689.
- Hoppe, H. [1998], Smooth view-dependent level-of-detail control and its application to terrain rendering, *in*: 'IEEE Visualization '98', Seiten 35–42.
- Hoppe, H., DeRose, T., Duchamp, T., McDonald, J. & Stuetzle, W. [1993], Mesh optimization, *in*: 'Computer Graphics (SIGGRAPH '93)', Seiten 19–26.
- Hurni, L., Neumann, A. & Hutzler, E. [1999], Digital Cliff Drawing for Topographic Maps, *in*: 'Proceedings of the 19th International Cartographic Conference of the ICA', Ottawa, Canada.
- Imhof, E. [1965], *Kartographische Geländedarstellung*, Walter de Gruyter & Co., Berlin.
- ISL, I. S. L. [1996], Product description demo of Data Mining Tool "Clementine", Technical report, Sussex, UK.
- Jäger, E. [1990], Untersuchungen zur kartographischen Symbolisierung und Verdrängung im Rasterdatenformat, Doktorarbeit, Fachrichtung Vermessungswesen, Universität Hannover.
- Jähne, B. [1989], *Digitale Bildverarbeitung*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Jiang, X. Y. & Bunke, H. [1994], 'Fast Segmentation of Range Images into Planar Regions by Scan Line Grouping', *Machine Vision and Applications* **7**(2), 115–122.
- Jones, C. & Luo, L. [1994], Hierarchies and Objects in a Deductive Spatial Database, *in*: T. Waugh & T. Healey, Hrsg., 'Advances in GIS Research, Proc. of 6th Int. Symposium on Spatial Data Handling (SDH)', Vol. 1, Taylor & Francis, Seiten 588–603.
- Junger, B. & Snoeyink, J. [1998], Importance Measures for TIN Simplification by Parallel Decimation, *in*: T. Poiker & N. Chrisman, Hrsg., 'Proceedings of the 8th International Symposium on Spatial Data handling', Vancouver, Canada, Seiten 637–646.
- Kidner, D. & Jones, C. B. [1994], A Deductive Object-Oriented GIS for Handling Multiple Representations, *in*: Waugh & Healey [1994], Seiten 882–900.
- Kilpeläinen, T. [1992], Multiple representations and knowledge-based generalization of topographical data, *in*: 'International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing', Washington, D.C., Seiten 954–964.
- Kilpeläinen, T. [1996], 'Updating Multiple Representation Geodata Bases by Incremental Generalization', *GIS - Geo-Information-Systeme* **8**(4), 13–18.
- Klein, A. [1999], Untersuchungen zur Mehrfachrepräsentation von 3D-Objekten am Beispiel von Gebäuden, Diplomarbeit, ifp-Diplomarbeit, unveröffentlicht.
- Kofler, M. [1998], R-Trees for Visualizing and Organizing large 3D Databases, Doktorarbeit, University Graz.
- Kofler, M. & Gruber, M. [1998], 'Verwaltung und Visualisierung dreidimensionaler Stadtmodelle', *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung (ZPF)* (2), 44–57.

- Kohonen, T. [1982], 'Self-Organized Formation of Topologically Correct Feature Maps', *Biological Cybernetics* **42**, 59–69.
- Koperski, K. & Han, J. [1995], Discovery of Spatial Association Rules in Geographic Databases, *in*: M. J. Egenhofer & J. R. Herring, Hrsg., 'Advances in Spatial Databases '95', Vol. 951 of *Lecture Notes in Computer Science*, Springer Verlag, Heidelberg, Seiten 47–66.
- Kraak, M. & Molenaar, M., Hrsg. [1996], *Advances in GIS Research, Proc. of 7th Int. Symposium on Spatial Data Handling (SDH)*, Vol. 1, Faculty of Geod. Engineering, Delft, The Netherlands.
- Krzystek, P. [1991], Fully Automatic Mensuration of Digital Elevation Models with MATCH-T, *in*: '43rd Photogrammetric Week 91', Schriftenreihe des Instituts für Photogrammetrie, Institut für Photogrammetrie, Stuttgart, Seiten 203–214.
- Lamy, S., Ruas, A., Demazeau, Y., Jackson, M., Mackaness, W. & Weibel, R. [1999], The Application of Agents in Automated Map Generalization, *in*: 'Proceedings of the 19th International Cartographic Conference of the ICA', Ottawa, Canada.
- Laurini, R. [1998], 'Spatial multi-database topological continuity and indexing: a step towards seamless GIS data interoperability', *International Journal of Geographical Information Science* **12**(4), 373–402.
- Laurini, R. & Thompson, D. [1999], *Fundamentals of Spatial Information Systems*, The Apic Series, 7 edn, Academic Press, London.
- Lawson, C. & Hanson, R. [1974], *Solving Least Squares Problems*, Vol. 15 of *Classics in Applied Mathematics*, SIAM – Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia.
- Lay, H.-G. & Weber, W. [1983], 'Waldgeneralisierung durch digitale Rasterdatenverarbeitung', *Nachrichten aus dem Karten- und Vermessungswesen* **I**(92), 61–72.
- Lecordix, F., Plazanet, C. & Lagrange, J. [1997], 'A platform for research in generalization: application to caricature', *Geoinformatica* **1**(2), 161–182.
- Lee, D. [1999], New Cartographic Generalization Tools, *in*: 'Proceedings of the 19th International Cartographic Conference of the ICA', Ottawa, Canada.
- Lemke, C. [1968], On Complementary Pivot Theory, *in*: E. Datnzig & A. Veinott, Hrsg., 'Mathematics of the Decision Sciences, Part 1', American Math. Society, Providence.
- Leung, Y., Leung, K. & He, J. [1999], 'A generic concept-based object-oriented geographical information system', *International Journal of Geographical Information Science* **13**(5), 475–498.
- Lichtner, W. [1976], Ein Ansatz zur Durchführung der Verdrängung bei der EDV-unterstützten Generalisierung in topographischen Karten, Doktorarbeit, Fachrichtung Vermessungswesen, Universität Hannover.
- Lillesand, T. M. & Kiefer, R. W. [1999], *Remote Sensing and Image Interpretation*, 4th edn, John Wiley & Sons.
- Mackaness, W. [1994], 'An algorithm for conflict identification and feature displacement in automated map generalization', *Cartography and Geographic Information Science* **21**(4), 219–232.
- Mackaness, W. [1995], A Constraint Based Approach to Human Computer Interaction in Automated Cartography, *in*: 'Proceedings of the 17th International Cartographic Conference of the ICA', Barcelona, Spanien, Seiten 1423–1432.
- Mackaness, W., Weibel, R. & Buttenfield, B. [1997], Report of the 1997 ICA Workshop on Map Generalization, 19-21 June, Technical report, <http://www.geo.unizh.ch/ICA/>, Gävle, Sweden.
- Marceau, D., Gratton, D. J., Fournier, R. & Fortin, J.-P. [1994], 'Remote Sensing and the Measurement of Geographical Entities in a Forested Environment. 2. The Optimal Spatial Resolution', *Remote Sensing Environment* **49**, 105–117.

- Marceau, D., Howarth, P. & Gratton, D. J. [1994], 'Remote Sensing and the Measurement of Geographical Entities in a Forested Environment. 1. The Scale and Spatial Aggregation Problem', *Remote Sensing Environment* **49**, 93–104.
- Mark, D. [1989], Multiple views of multiple representations, Technical Report 89-3, Department of Geography, New York.
- Mark, D. [1991], Object modelling and phenomenon-based generalization, in Buttenfield & McMaster [1991], Seiten 103–118.
- Marr, D. & Hildreth, E. [1980], Theory of edge detection, in: 'Proc. Roy. Soc. London', Vol. 207 of *Series B*, Seiten 187–217.
- Mayer, H. [1998a], *Automatische Objektextraktion aus digitalen Luftbildern*, Vol. 494 of *Reihe C*, Deutsche Geodätische Kommission, Technische Universität München.
- Mayer, H. [1998b], Model-generalization of building outlines based on scale-spaces and scale-space events, in: 'International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing', Vol. 32/3, ISPRS Commission III Symposium on Object Recognition and Scene Classification from Multispectral and Multisensor Pixels, Columbus/Ohio, USA, Seiten 530–536.
- McKee, L. & Kuhn, W. [1997], The OpenGIS Consortium's Purpose and Technical Approach, in: D. Fritsch D., Hobbie, Hrsg., 'Photogrammetric Week '97', Wichmann, Heidelberg, Seiten 56–67.
- McMaster [1991], Conceptual frameworks for geographical knowledge, in Buttenfield & McMaster [1991], Seiten 103–118.
- McMaster, R. & Shea, K. [1988], Cartographic Generalization In A Digital Environment: A Framework For Implementation In A Geographic Information System, in: 'GIS/LIS'88', San Antonio, Seiten 240–249.
- Meng, L. [1997], Automatic Generalization of Geographic Data, Technical report, http://www.vbbviak.sweco.se/Research_net/preport/fm9706.htm, Sweden.
- Meng, L. [1998], Cognitive modeling of cartographic generalization, Technical report, <http://www.hig.se/t-inst/sb/forsk/liqiumeng/liqiumeng.htm>, Sweden.
- Meyer, U. [1989], Generalisierung der Siedlungsdarstellung in digitalen Situationsmodellen, Doktorarbeit, Fachrichtung Vermessungswesen, Universität Hannover.
- Michalski, R., Carbonell, J. & Mitchell, T. [1984], *Machine Learning - An Artificial Intelligence Approach*, Springer-Verlag, Berlin.
- Misund, G. [1996], Varioscale TIN Based Surfaces, in Kraak & Molenaar [1996], Seiten 6.35–6.46.
- Müller, J. [1991], *Prospects for and Impediments against a new Cartography in the 1990s*, Elsevier Applied Science, London, New York, chapter 1, Seiten 1–13.
- Müller, J. & Wang, Z. [1992], 'Area-patch generalisation: a competitive approach', *The Cartographic Journal* **29**, 137–144.
- Molenaar, M. [1989], Knowledge Representation in Vector Structured Data Bases, in: M. Schilcher & D. Fritsch, Hrsg., 'Geo-Informationssysteme: Anwendungen - Neue Entwicklungen', Wichmann Verlag, Karlsruhe, Seiten 311–321.
- Molenaar, M. [1996a], The role of topologic and hierarchical spatial object models in database generalization, in Molenaar [1996b], Seiten 13–35.
- Molenaar, M., Hrsg. [1996b], *Methods for the Generalization of Geo-Databases*, number 43, Netherlands Geodetic Commission, Delft.
- Morisset, B. & Ruas, A. [1997], Simulation and agent modelling for road selection in generalization, in: 'Proceedings of the 18th International Cartographic Conference of the ICA', Stockholm, Sveden, Seiten 1376–1380.

- Müller, J.-C., Lagrange, J.-P. & Weibel, R., Hrsg. [1995], *GIS and Generalization - Methodology and Practice*, Taylor & Francis.
- Müller, J., Weibel, R., Lagrange, J. & Salge, F. [1995], *Generalization: state of the art and issues*, in Müller, Lagrange & Weibel [1995], Seiten 3–17.
- Mustiere, S. [1998], GALBE: Adaptive generalization. The need for an adaptive process for automated generalisation, an example on road, *in*: ‘Proceedings of GIS Planet ’98’, Lissabon, Portugal.
- Neisser, U. [1996], *Kognition und Wirklichkeit: Prinzipien und Implikationen der kognitiven Psychologie*, 2. edn, Klett Cotta, Stuttgart.
- Nickerson, B. [1988], ‘Automatic cartographic generalization for linear features’, *Cartographica* **25**(3), 15–66.
- Nilsson, N. J. [1982], *Principles of Artificial Intelligence*, Springer Verlag, Berlin.
- OGIS [1999], (Open GIS Consortium) The OpenGIS Guide: Introduction to Interoperable Geoprocessing, Technical report, <http://www.opengis.org/techno/guide.htm>.
- Ormeling, F. [1996], Aggregation objectives and related decision functions, *in* Molenaar [1996b], Seiten 1–11.
- Papadias, D. & Egenhofer, M. [1997], ‘Algorithms for Hierarchical Spatial Reasoning’, *GeoInformatica* **1**, 3.
- Peng, W. [1997], Automated Generalization in GIS, Doktorarbeit, ITC, Delft, Netherlands.
- Perona, P. & Malik, J. [1988], Scale-Space and Edge Detection Using Anisotropic Diffusion, Technical Report UCB/CSD 88/483, Computer Science Division, University of California.
- Pinz, A. [1996], *Bildanalyse*, Springer.
- Plazanet, C. [1996], Geographical Database Enrichment: analyzing the geometry of linear features for automated generalization (application on roads), Doktorarbeit, IGN, Frankreich.
- Plazanet, C., Bigolin, N. & Ruas, A. [1998], ‘Experiments with Learning Techniques for Spatial Model Enrichment and Line Generalization’, *GeoInformatica* **2**(4), 315–334.
- Plietker, B. [1994], Semiautomatic Revision of Street Objects in ATKIS Database DLM 25/1, *in*: ‘International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing’, ISPRS Commission IV, Atlanta, USA, Seiten 311–317.
- Powitz, B. [1992], ‘Kartographische Generalisierung topographischer Daten in GIS’, *Kartographische Nachrichten* **43**(6), 229–233.
- Preparata, F. & Shamos, M. [1993], *Computational Geometry: An Introduction*, Monographs in Computer Science, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Quattrochi, D. & Goodchild, M., Hrsg. [1997], *Scale in Remote Sensing and GIS*, Lewis Publishers.
- Quinlan, J. [1986], ‘Induction of Decision Trees’, *Machine Learning* **1**(1), 81–106.
- Quint, F. [1997], Kartengestützte Interpretation monokularer Luftbilder, Doktorarbeit, Universität Karlsruhe, Deutsche Geodätische Kommission.
- Regnault, N. [1996], Recognition of Building Clusters for Generalization, *in* Kraak & Molenaar [1996], Seiten 4B.1–4B.14.
- Regnault, N. & Mustiere, S. [2000], Optimising Generalisation Sequences Using Machine Learning Techniques, *in*: ‘Proc. First National Conference on GIS Research UK’, UK.
- Reimer, U. [1991], *Einführung in die Wissensrepräsentation*, Teubner, Stuttgart.
- Rich, E. [1988], *Künstliche Intelligenz*, McGraw-Hill.
- Richardson, D. & Thomson, R. [1996], ‘Integrating thematic, geometric, and topological information in the generalization of road networks’, *Cartographica, Monograph 47* **33**(1), 75–84.

- Richardson, D. & Thomson, R. [1999], The 'good-continuation' principle of perceptual organization applied to the generalization of road networks, *in*: 'Proceedings of the 19th International Cartographic Conference of the ICA', Ottawa, Canada.
- Ritter, H., Martinetz, T. & Schulten, K. [1990], *Neuronale Netze – Eine Einführung in die Neuroinformatik selbstorganisierender Netzwerke*, Addison-Wesley, Bonn, München, Reading.
- Rosen, B. & Saalfeld, A. [1985], Match Criteria for Automatic Alignment, *in*: 'Auto-Carto 7, Washington D.C.', Seiten 121–130.
- Ruas, A. [1998], 'A method for building displacement in automated map generalization', *International Journal of Geographical Information Science* **12**(8), 789–804.
- Ruas, A. [1999], *Modele de generalisation de deonnees geographiques a base de contraintes et d'autonomie*, Doktorarbeit, Universite de Marne La Vallee, Paris, Frankreich.
- Ruas, A. & Mackaness, W. [1997], Strategies for urban map generalization, *in*: 'Proceedings of the 18th International Cartographic Conference of the ICA', Stockholm, Sveden, Seiten 1376–1380.
- Ruas, A. & Plazanet, C. [1996], Strategies for automated generalization, *in* Kraak & Molenaar [1996], Seiten 6.1–6.18.
- Rumbaugh, J., Blaha, M., Premerlani, W., Eddy, F. & Lorenson, W. [1991], *Object-Oriented Modeling and Design*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Rumelhard, D. & McClelland, J. [1986], *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition*, MIT Press, Cambridge.
- Saalfeld, A. [1988], 'Automated Map Compilation', *International Journal of Geographical Information Systems* **2**(3), 217 – 228.
- Samet, H. [1990], *The Design and Analysis of Spatial Data Structure*, Addison-Wesley, Reading, MA.
- Sarjakoski, T. & Kilpelainen, T. [1999], Holistic Cartographic Generalization by Least Squares Adjustment for Large Data Sets, *in*: 'Proc. ICA', International Cartographic Association, Ottawa, Canada.
- Sayda, F. [1999], Scale dependent visualization of large digital terrain models, Diplomarbeit, ifp-Diplomarbeit, unveröffentlicht.
- Schauffer, G. & Stürzlinger, W. [1995], 'Generating Multiple Levels of Detail from Polygonal Geometry Models', *Virtual Environments '95*.
- Schenk, T. & Toth, C. [1993], Towards a fully automated aerotirangulation system, *in*: 'ASPRS, Technical Papers (3)', Seiten 340–347.
- Schittenhelm, R. [1978], 'Zum Problem der Verdrängung als Teilvorgang der Generalisierung topographischer Karten – Hierarchievorschlagn und Versuch einer EDV-gestützten Lösung', *Nachrichten aus dem Karten- und Vermessungswesen* **I**(74), 5–19.
- Schmalstieg, D. [1997], Lodestar - An Octree-Based Level of Detail Generator for VRML, *in*: 'Proceedings of SIGGRAPH Symposium on VRML'.
- Schürer, D. [1998], 'Modellgeneralisierung von linienförmigen Objekten bei Übergang von DLM25 auf DLM200', *Nachrichten aus dem Karten- und Vermessungswesen* **I**(118), 97–110.
- Schweinfurth, G. [1984], *Höhenliniengeneralisierung mit Methoden der digitalen Bildverarbeitung*, Vol. C 291, Deutsche Geodätische Kommission, München.
- Sester, M. [1990], Multiscale Representation for Knowledge Based Recognition and Tracking of Objects in Image Sequences, *in*: 'International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing', Vol. 28, ISPRS, Comm. III, Wuhan.

- Sester, M. [1995], Lernen struktureller Modelle für die Bildanalyse, Doktorarbeit, Universität Stuttgart, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 441, München.
- Sester, M. [1999a], 'Acquiring transition rules between multiple representations in a GIS: an experiment with area aggregation', *Computers, Environment and Urban Systems* **23**, 5–17.
- Sester, M. [1999b], Generalization based on Least Squares Adjustment, Presentation at the International Cartographic Conference, ICA, Ottawa.
- Sester, M. [2000], 'Knowledge Acquisition for the Automatic Interpretation of Spatial Data', *International Journal of Geographical Information Science* **14**(1), 1–24.
- Sester, M., Anders, K.-H. & Walter, V. [1998], 'Linking Objects of Different Spatial Data Sets by Integration and Aggregation', *GeoInformatica* **2**(4), 335–358.
- Sester, M. & Klein, A. [1999], Rule Based Generalization of Buildings for 3D-Visualization, *in*: 'Proceedings of the 19th International Cartographic Conference of the ICA', Ottawa, Canada, Seiten 214–224.
- Shea, K. & McMaster, R. [1989], Cartographic generalization in a digital environment: when and how to generalize, *in*: 'Ninth International Symposium on Computer-Assisted Cartography', Baltimore, Maryland, Seiten 56–67.
- Smith, S. M. & Petermann, V. [1996], 'Outside plant facilities location and data conversion techniques', *AM/FM International, March 1996*.
- Spieß, E. [1995], *The need for generalization in a GIS environment*, in Müller, Lagrange & Weibel [1995], Seiten 31–46.
- Staufenbiel, W. [1973], Zur Automation der Generalisierung topographischer Karten mit besonderer Berücksichtigung großmaßstäbiger Gebäudedarstellungen, Doktorarbeit, Fachrichtung Vermessungswesen, Universität Hannover.
- Stell, J. & Worboys, M. [1998], Stratified Map Spaces: A Formal Basis for Multi-resolution Spatial Databases, *in*: T. Poiker & N. Chrisman, Hrsg., 'Proceedings of the 8th International Symposium on Spatial Data handling', Vancouver, Canada, Seiten 180–189.
- Su, B., Li, Z. & Lodwick, G. [1998], 'Morphological Models for the Collapse of Area Features in Digital Map Generalization', *GeoInformatica* **2**(4), 359–382.
- Su, B., Li, Z., Lodwick, G. & Müller, J.-C. [1997], 'Algebraic Models for the Aggregation of Area Features Based Upon Morphological Operators', *International Journal of Geographical Information Science* **11**(3), 233–246.
- Timpf, S. [1998], Hierarchical Structures in Map Series, Doktorarbeit, Insitut für Geoinformation, Technische Universität Wien.
- Tomaselli, L. [1994], Topological transfer: evolving linear GIS accuracy, *in*: 'URISA (Urban and Regional Information Association)', Seiten 245 – 259.
- Töpfer, F. [1976], 'Ein Auswahlprogramm für punktförmige Objekte', *Vermessungstechnik* **24**(11), 417–420.
- Töpfer, F. [1992a], 'Generalisierungsaufgaben in GIS', *GIS - Geo-Informationssysteme* **5**(3), 7–12.
- Töpfer, F. [1992b], 'Zur Bedeutung der kartographischen Generalisierung für Geo-Informationssysteme', *Kartographische Nachrichten* **42**(1), 12–20.
- Tsingas, V. [1992], Automatisierung der Punktübertragung in der Aerotriangulation durch mehrfache digitale Bildzuordnung, Doktorarbeit, Stuttgart University.
- UCGIS [1998], Research Priorities, Technical report, <http://www.ucgis.org/research98.html>, USA.
- Uitermark, H., van Oosterom, P., Mars, N. & Molenaar, M. [1998], Propagating Updates: Finding Corresponding Objects in a Multi-source Environment, *in*: T. Poiker & N. Chrisman, Hrsg., 'Proc. of 8th Int. Symposium on Spatial Data Handling (SDH)', Vancouver, BC, Canada, Seiten 580–591.

- Uitermark, H., van Oosterom, P., Mars, N. & Molenaar, M. [1999], Ontology-Based Geographic Data Set Integration, *in*: 'presented at STDBM '99', Schottland. (auch verfügbar: <http://ooa.kadaster.nl>).
- van der Poorten, P. & Jones, C. [1999], Customizable Line Generalization using Delaunay Triangulation, *in*: 'Proceedings of the 19th International Cartographic Conference of the ICA', Ottawa, Canada.
- van Oosterom, P. [1990], Reactive Data Structures for Geographic Information Systems, Doktorarbeit, Leiden University.
- van Oosterom, P. [1995], The GAP-tree, an approach to 'on-the-fly' map generalization of an area partitioning, *in* Müller, Lagrange & Weibel [1995], Seiten 120–132.
- van Smaalen, J. [1996], 'Spatial Abstraction based on Hierarchical Re-Classification', *Cartographica, Monograph 47* **33**(1), 65–74.
- van Wijngaarden, F., van Putten, J., van Oosterom, P. & Uitermark, H. [1997], Map Integration - Update propagation in a Multi-Source Environment, *in*: 'Proceedings of the 5th International Workshop on Advances in Geographic Information Systems', Las Vegas, USA.
- Vögtle, T. & Schilling, K.-J. [1995], 'Wissensbasierte Extraktion von Siedlungsbereichen in der Satellitenbild-analyse', *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung (ZPF)* **63**(5), 199–207.
- Volz, S., Sester, M., Fritsch, D. & Leonhardi, A. [2000], Multi-scale Data Sets in Distributed Environments, *in*: 'IAPRS', Vol. 33, ISPRS, Amsterdam, Holland.
- Walter, V. [1999], Automated GIS data collection and update, *in*: D. Fritsch & R. Spiller, Hrsg., 'Photogram-metric Week '99', Wichmann Verlag, Heidelberg, Germany, Seiten 267 – 280.
- Walter, V. & Fritsch, D. [1999], 'Matching Spatial Data Sets: a Statistical Approach', *International Journal of Geographical Information Science* **13**(5), 445–473.
- Ware, J. & Jones, C. [1998], 'Conflict Reduction in Map Generalization Using Iterative Improvement', *GeoIn-formatica* **2**(4), 383–407.
- Waugh, T. & Healey, T., Hrsg. [1994], *Advances in GIS Research, Proc. of 6th Int. Symposium on Spatial Data Handling (SDH)*, Vol. 2, Taylor & Francis.
- Weibel, R. [1995], *Three essential Building blocks for automated generalization*, *in* Müller, Lagrange & Weibel [1995], Seiten 56–70.
- Weibel, R., Keller, S. & Reichenbacher, T. [1995], Overcoming the Knowledge Acquisition Bottleneck in Map Generalization: The Role of Interactive Systems and Computational Intelligence, *in*: A. Frank & W. Kuhn, Hrsg., 'Spatial Information Theory', Vol. 988 of *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, Berlin, Seiten 139–156.
- Winston, P. [1977], *Artificial Intelligence*, Addison-Wesley, Reading, MA.
- Witkin, A. [1986], Scale Space Filtering, *in*: Pentland, Hrsg., 'From Pixels to Predicates'.
- Woodcock, C. & Strahler, A. [1987], 'The factor of scale in remote sensing', *Remote Sensing Environment* **21**, 311–332.
- Worboys, M. [1995], *GIS – A Computing Perspective*, Taylor and Francis.
- Zimmermann, G. [1991], Automatic acquisition of optiacl landmarks from image sequences, *in*: K. Linkwitz & U. Hangleiter, Hrsg., 'High Precision Navigation 91', Dümmler Verlag, Bonn, Seiten 281–290.