

Automatische Generalisierung mittels Ausgleichung MONIKA SESTER¹

Zusammenfassung: Ausgleichung ist ein Verfahren, welches in der Geodäsie für die Bestimmung von Unbekannten ausgehend von gegebenen Beobachtungen eingesetzt wird. Voraussetzung sind bekannte funktionale Beziehungen zwischen den Beobachtungen und den Unbekannten. Es wird vorgestellt, wie Ausgleichungstechnik für die Lösung von Generalisierungsverfahren der Kartographie verwendet werden kann. Zunächst kann sie genutzt werden, um eine Vereinfachung von Gebäudegrundrissen zu erreichen. Als zweite Methode wird gezeigt, wie Ausgleichung als Optimierungsmethode für das Verdrängungsproblem eingesetzt wird. Beispiele belegen die Nützlichkeit der Verfahren.

Summary: Adjustment theory is a well-known technique in geodesy. It is commonly used to determine unknown parameters given measurements or observations. The result is the optimal solution, including quality parameters. In this paper adjustment theory is used for solving generalization problems in cartography. Firstly, it is used for the generalization of building ground plans. Then, a method for solving the optimization problem of displacement is presented. Examples verify the suitability of the approaches.

1 Einführung und Übersicht

Die Automation der Generalisierung wird schon seit vielen Jahren intensiv erforscht. Es existieren hierfür eine Vielzahl von Einzellösungen, die in einigen Bereichen auch bereits in die Praxis Einzug gehalten haben. Dennoch besteht aber noch weiterhin Forschungsbedarf, der sich in folgenden Punkten manifestiert: die Integration verschiedener Generalisierungsmethoden, sowie die Nutzung von solchen Methoden in GIS, im Zusammenhang mit dem Problem der maßstabsabhängigen Darstellung.

Generalisierung wird benötigt, um relevante Information in einer für das Problem angemessenen Darstellung zu präsentieren. Da in einer Auflösung nur eine begrenzte Anzahl von Objekten dargestellt werden können, müssen diese gewissermaßen um ihre Darstellung „kämpfen“. Dies bedeutet, dass Generalisierung, speziell die Verdrängung, ein Optimierungsproblem darstellt, bei dem verschiedene Ziele gleichermaßen befriedigt werden müssen.

Im folgenden wird vorgestellt, wie Ausgleichungstechnik als Optimierungsmethode für Probleme der automatischen kartographischen Generalisierung eingesetzt werden kann. Hierbei macht man sich das Prinzip zu nutze, ein optimales Ergebnis unter vorgegebenen Randbedingungen zu erzielen. Diese Randbedingungen sind für unterschiedliche Aufgabenstellungen verschieden, jedoch wird immer der gleiche Ausgleichungsansatz – vermittelnde Ausgleichung – eingesetzt. Das Verfahren wird anhand zweier Beispiele verdeutlicht, die Vereinfachung von Gebäudegrundrissen und die Verdrängung.

Zunächst erfolgt ein Überblick über verwandte Arbeiten, wobei eine Konzentration auf die zwei Generalisierungsprobleme erfolgt, welche Gegenstand dieser Arbeit sind. Anschließend wird der ausgleichungsbasierte Ansatz beschrieben, wobei die Verfahrensansätze im einzel-

¹ Dr.-Ing. Monika Sester, Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, Geschwister-Scholl-Str. 24, 70174 Stuttgart, monika.sester@ifp.uni-stuttgart.de

nen kurz vorgestellt werden. Beide Ansätze werden anhand von Beispielen verifiziert. Eine Bewertung und eine Zusammenfassung beschließen den Aufsatz.

2 Verwandte Arbeiten

Im Bereich der (kartographischen) Generalisierung wird schon seit vielen Jahren geforscht. Kennzeichen ist, dass eine Vielzahl an Einzellösungen entstanden sind, die sich jeweils spezifischen kartographischen Problemen gewidmet haben. Bekanntestes Problem ist das der Vereinfachung, für welches beispielsweise der Douglas-Peucker-Algorithmus zur Liniengenerierung entwickelt wurde. Vereinfachung im Bereich der Gebäudegrundrisse tragen den speziellen Gegebenheiten von Gebäuden (Rechtwinkligkeit, Parallelität) Rechnung (Staufenbiel, 1973, Regnault, et al. 1999, Lee, 1999). Bezüglich der Verdrängung existiert eine Reihe von Ansätzen, welche sich im wesentlichen darin unterscheiden, wie die Nachbarschaft (und damit potentielle Konflikte) ermittelt werden. Oft wird mit einem Raster gearbeitet, welches regelmäßig oder unregelmäßig sein kann. Jäger (1990) hat hierzu das sog. Verdrängungsgewirge eingesetzt, stark verbreitet sind mittlerweile Triangulierungsansätze. In jüngster Zeit kann ein Aufkommen von Verfahren, die auf Kräftenmodellen beruhen, beobachtet werden. Burghard & Meier (1997) nutzen einen Snakes-Ansatz, um lineare Objekte (Strassen, Eisenbahnlinsen, etc.) zu verdrängen. Hojholt (1998) wendet die Finite-Elemente-Methode an, und ist damit in der Lage, flächenhafte Objekte zu verdrängen. Bobrich (1996) setzt ebenfalls ein Analogon aus der Mechanik ein, nämlich Federkräfte. Ware & Jones (1998) verwenden Simulated Annealing als Optimierungsmethode, um iterativ die Verdrängungskonflikte zu lösen. Ein ebenfalls iterativer Ansatz von Ruas (1998) arbeitet regelbasiert. Unabhängig wurden gleichzeitig von Harrie (1999), Sarjakoski & Kilpelainen (1999) und Sester (1999) Ideen entwickelt, Ausgleichungstheorie für das Verdrängungsproblem einzusetzen.

3 Ausgleichungsansatz für spezielle Generalisierungsaufgaben

Generalisierung kann in den hier behandelten Problemen als Optimierungsaufgabe angesehen werden. Im ersten Fall der Vereinfachung besteht der Ansatz darin, eine gegebene Messung an ein übergeordnetes Modell anzupassen. Für die Gebäudegeneralisierung lässt sich das Modell relativ einfach durch eine Sequenz von Regeln ermitteln. Im zweiten Fall der Verdrängung gilt es, die Position von Objekten zu optimieren – unter dem Zwang vorgegebener Mindestabstände zwischen den Objekten. Beide Optimierungsprobleme werden jeweils mittels einer vermittelnden Ausgleichung gelöst. Die bekannten Eigenschaften der Ausgleichung sind das Einbringen von Beobachtungsgenauigkeiten, die Möglichkeit, die Genauigkeitssituation der zu schätzenden Parameter durch zusätzliche Beobachtung zu modellieren, sowie die Ermittlung der Qualität und Zuverlässigkeit des Ergebnisses. Letzteres ist eine Eigenschaft, die gerade für automatische Verfahren von essentieller Bedeutung ist. Im Folgenden werden die beiden Ansätze beschrieben, und Beispiele hierzu gegeben.

3.1 Gebäudegeneralisierung

Der Ansatz zeichnet sich dadurch aus, dass ein einziger Parameter genügt, welcher den vollautomatischen Prozess steuert: die minimale Fassadenbreite, die in dem Zielmaßstab noch dargestellt werden kann.

Im Rahmen der Ausgleichung der Gebäudegrundrisse muss zunächst ein vereinfachtes Gebäudemodell erzeugt werden. Dieses stellt bereits eine Vereinfachung dar, ist jedoch üblicherweise nicht korrekt, nicht optimal. Daher wird es im anschließenden Optimierungspro-

zess auf das Originalgebäude angepasst. Für allgemeine Vereinfachungsfälle liegt das Problem in der Bestimmung des Modells. In diesem Fall jedoch kann es durch eine Sequenz von einfachen Regeln abgeleitet werden. Diese Regeln beschreiben, wie Gebäudekanten zu ersetzen sind, welche unterhalb der vorgegebenen Mindestbreite liegen. Folgende einfache Regeln genügen, um ein genähertes Gebäudemodell zu erzeugen:

1. **Vorsprung / Einsprung:** ist der Winkel zwischen vorgehender und nachfolgender Gebäudeseite etwa 180 Grad, so handelt es sich um einen Vor- bzw. Einsprung; dieser fällt weg und wird auf die Hauptfassade zurückgesetzt.
2. **Versatz:** ist der Winkel zwischen vorgehender und nachfolgender Gebäudeseite etwa 0 Grad, so handelt es sich um einen Versatz, die längere Gebäudeseite wird verlängert.
3. **Ecke:** ist der Winkel zwischen vorgehender und nachfolgender Gebäudeseite etwa 90 Grad, so werden die beiden Fassaden geschnitten.

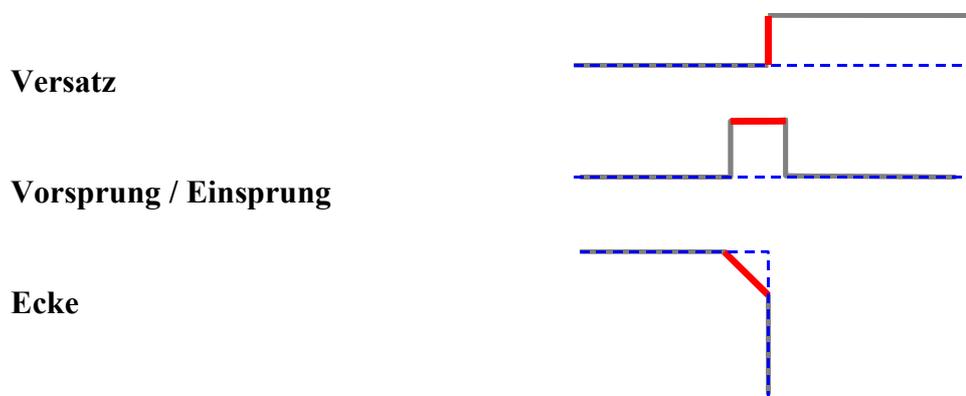


Abbildung 1: Regeln für das Erzeugen eines Gebäudemodells: Situation vor (fett) und nach der Generalisierung (gestrichelt).

Das Gebäudemodell wird anschließend in parametrische Form überführt. Parameter sind hier die Abschnitte in den zwei Hauptrichtungen des Gebäudes. Ein einfaches rechteckiges Gebäude kann somit durch zwei Parameter (Breite und Länge) dargestellt werden, während ein L-förmiges Haus vier Parameter erfordert. Im Ausgleichsprozess werden genau diese Parameter neu geschätzt, hinzu kommen noch zwei Positionsparameter. Die ursprünglichen Gebäudekanten werden als Beobachtungen angesetzt, welche als Funktion der Parameter dargestellt werden. Ein ähnlicher Ansatz wurde bereits erfolgreich für die Rekonstruktion von Gebäuden in Luftbildern eingesetzt (Sester & Förstner, 1989).

Abbildung 2 zeigt einen Ausschnitt aus einer dörflichen Situation (links). Wird als minimale Fassadenbreite der Wert 3m angenommen, so ergibt sich die Situation in Abbildung 2 (Mitte), ein Wert von 7m führt zur Situation in Abbildung 2 (rechts).

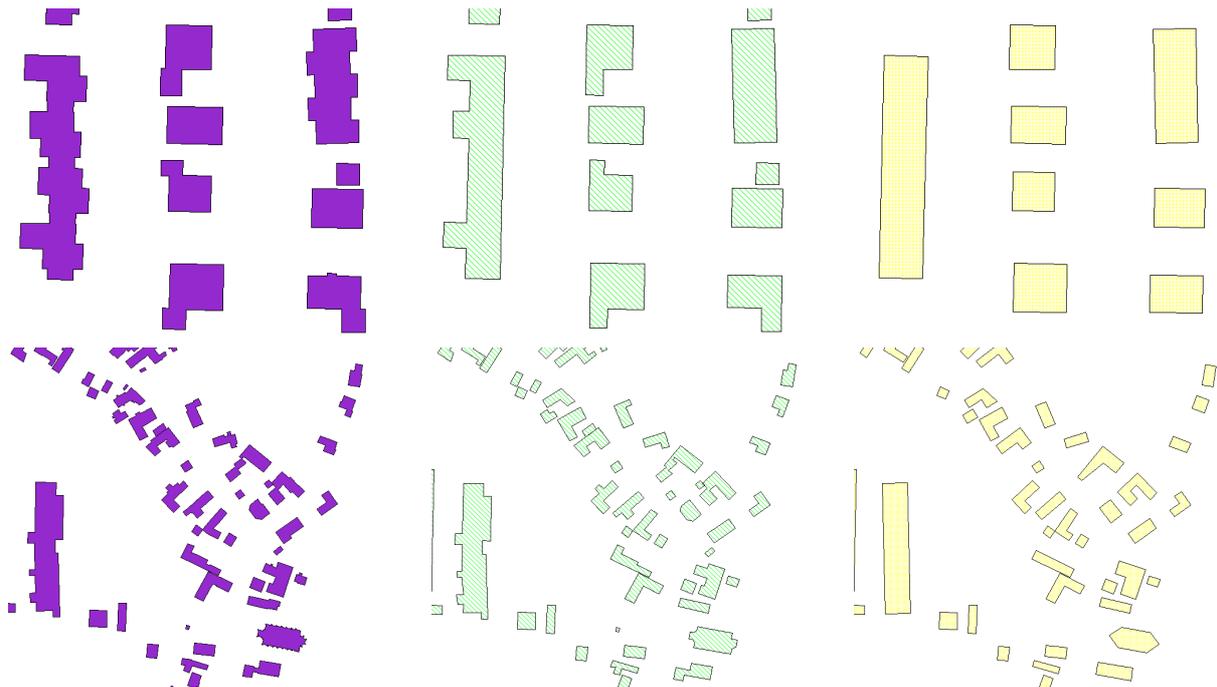


Abbildung 2: Gebäudevereinfachung: Original (links), Vereinfachung mit minimaler Fassadenbreite von 3m (Mitte), Vereinfachung mit minimaler Fassadenbreite von 7m (rechts).

Abbildung 3 zeigt einen Ausschnitt aus einem dichten innerstädtischen Bereich. Hier wird deutlich, dass eine separate Generalisierung jedes einzelnen Gebäudes dazu führen kann, dass sich benachbarte Gebäude überschneiden.



Abbildung 3: Original (links), Ergebnis (rechts)

3.1.1 Bewertung

Vorliegender Ansatz verwendet ähnliche Regeln, wie Staufenbiel (1973) sie aufgestellt hat – sie sind jedoch von deutlich einfacherer Gestalt. Diese Vereinfachung ist möglich, weil durch Anwendung der Regeln lediglich eine Näherungslösung gesucht wird. Im Ausgleichsschritt wird erreicht, dass der generalisierte Grundriss optimal auf die eigentliche, ursprüngliche Gebäudeform angepasst wird. Mit diesem Ansatz kann die aufwendige Positionsbestimmung der Gebäudeseiten entfallen. Ferner lassen sich noch weitere Größen im Ausgleichsprozess bestimmen bzw. festhalten, beispielsweise kann vorgegeben werden, dass die Gebäudeflächen erhalten bleiben. Es genügt ein einziger Parameter, welcher den gesamten Prozess steuert. Auch Sonderfälle wie treppenartige Strukturen werden richtig generalisiert. Außerdem erfolgt ein Rechtwinkelausgleich.

Jedes Gebäude wird für sich, separat generalisiert. In dichten Stadtgebieten werden benachbarte Objekte daher nicht gemeinsam vereinfacht. Dies führt dazu, dass eine frühere gemeinsame Gebäudekante nach der Vereinfachung nicht mehr identisch ist. Generell kommt es damit zu Überlappungen der vereinfachten Gebäude (vgl. Abb. 3). Ein sinnvoller Ausweg aus dieser Situation ist, benachbarte Objekte zusammenzufassen, und diese dann als *ein* Objekt zu vereinfachen. Es stellt sich danach allerdings das Problem, die Originalobjekte wiederherzustellen (falls dies gewünscht sein sollte).

Bislang werden alle Gebäudeobjekte separat vereinfacht, was insbesondere auch Innenhöfe betrifft. Im Regelfall führt dies zu ansprechenden Ergebnissen, es kann allerdings auch zu Überschneidungen führen. Hier sollte eine Systemerweiterung erfolgen, welche Gebäude zusammen mit ihren Innenhöfen gemeinsam ausgleicht.

3.2 Verdrängung

Mit diesem Ansatz lassen sich sowohl linienhafte, als auch flächenförmige Objekte bearbeiten. Als Unbekannte werden die Koordinaten der Objektpunkte eingeführt. Eine Klasse von Beobachtungen charakterisiert die Objekte selbst und beschreibt die Form der Objekte über die einzelnen Objektseiten, die Objektwinkel, sowie die Objektorientierung. Die zweite wichtige Beobachtungskategorie sind die Abstände zwischen den Objekten. Liegen die Abstandswerte unterhalb der vorgegebenen Minimaldistanz, so wird als Sollwert die Minimaldistanz eingesetzt. Hierdurch entstehen dann die Zwänge, die ausgeglichen werden müssen. Die Koordinatenunbekannten werden als zusätzliche Beobachtungen eingeführt. Das stochastische Modell beschreibt die Genauigkeitssituation: die objektspezifischen Beobachtungen werden hoch gewichtet, die Abstände erhalten in Abhängigkeit ihrer Größe entweder hohe (falls Minimalabstand erzwungen werden muss) oder geringe Gewichte (falls genügend großer Abstand vorliegt). Die Koordinaten werden i.a. gering gewichtet, womit eine beliebige Verschiebung der Objekte erreicht wird. Wichtig ist jedoch die Möglichkeit, Objekte aufgrund ihres Typs zu gewichten und damit zu generalisieren. Auf diese Weise lassen sich Objekte als deformierbar oder steif (geringes bzw. hohes Gewicht der objektspezifischen Parameter), bzw. als verschiebbar oder fix (geringes bzw. hohes Gewicht der Objektkoordinaten) spezifizieren. Diese Festlegungen lassen sich bezüglich Objektklassen, aber auch auf der Objektebene durchführen.

Zur Bestimmung der Nachbarschaft der Objekte, wird eine Triangulierung aller Objekte gerechnet, wobei erzwungen wird, dass die Objektkanten gleichzeitig Dreieckskanten darstellen (Constrained Delaunay-Triangulation). Objekte sind benachbart, wenn sie ein gemeinsames Dreieck besitzen, womit die Nachbarschaft sehr leicht ermittelt werden kann. Wichtigster Steuerparameter im Gesamtprozess ist der minimale Objektabstand. Ferner kann zusätzlich angegeben werden, ob Objekte deformierbar oder fix sein sollen.

Abbildung 4a zeigt die Originalsituation vor der Verdrängung. Offensichtlich sind die Abstände zwischen Strassen und Gebäuden, sowie zwischen den Gebäuden untereinander zu gering. Im automatischen Prozess wird zunächst eine Triangulation gerechnet (4b), aus welcher die Nachbarschaften der Objekte entnommen werden können. Das Ergebnis der Verdrängung zeigen Abbildungen 4c und 4d: hier wurde eine Minimaldistanz von 7m zwischen den Objekten gefordert, zudem wurden die Strassen festgehalten. Sind die Zwänge zu stark, d.h. wird eine zu große Minimaldistanz gefordert, führt dies zu starken Deformationen mancher Objekte. Die maximalen Deformationen der Gebäudeseiten können sowohl zahlenmäßig

als auch farblich kodiert wiedergegeben werden. Somit ist es auf einen Blick möglich, das Ergebnis zu evaluieren, und eventuell kritische Stellen zu identifizieren, d.h. Objekte, die sehr stark deformiert worden sind (vgl. die Gebäude zwischen den zwei Strassen in Abb. 4e). Lässt man nun allerdings die Strassen frei, so zeigt sich, dass dies zu einer wesentlichen „Entkrampfung“ der Situation führt: die Deformationen sind jetzt nur noch sehr gering.

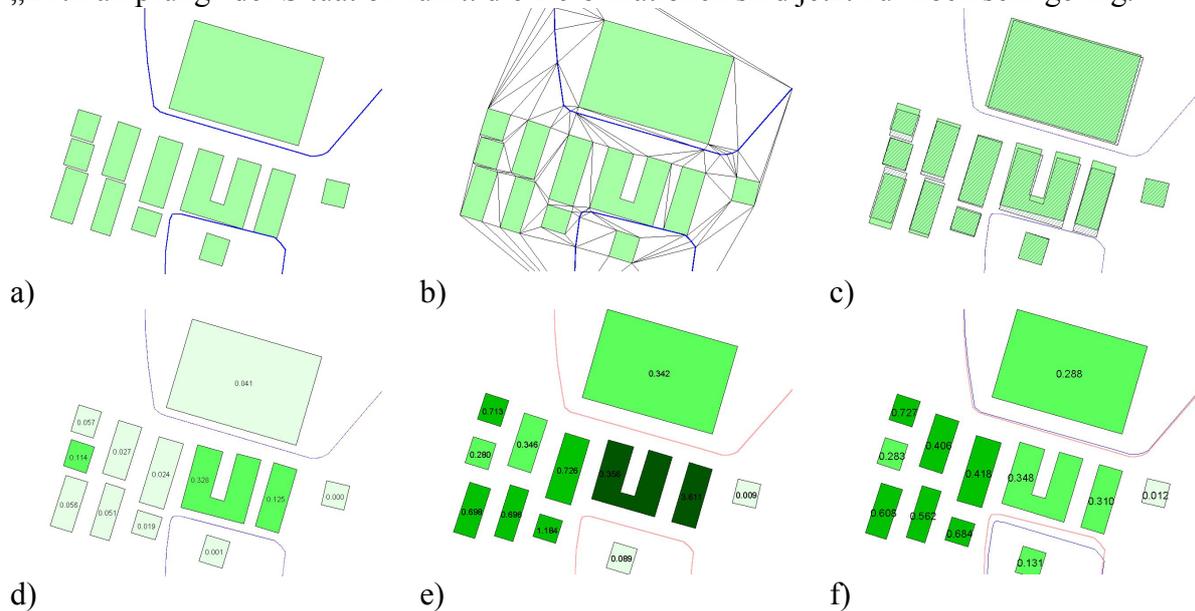


Abbildung 4: Beispiel für die Verdrängung von Gebäuden und Strassen: a) Originalsituation, b) Constrained Triangulation, c) Überlagerung von Originalsituation und Ergebnis nach der Verdrängung (min. Distanz = 7m), d) maximale Deformation in den Gebäudeseiten (in m; je dunkler, desto stärker), e), starke Verdrängung: min. Distanz = 15m, Strassen sind fix: maximale Deformationen in den Gebäudeseiten, f) Verdrängung: min. Distanz = 15m, Strassen sind verschiebbar: deutlich geringere maximale Deformationen in den Gebäudeseiten.

Die folgende Abbildung zeigt ein klassisches Verdrängungsproblem: ein Fluss, Strassen und Eisenbahnlinien sollen gemeinsam dargestellt werden (4a). Das Ergebnis der Verdrängung ist in Abbildung (4b) gegeben. Es zeigt sich, dass die Objekte – unter Wahrung ihrer ursprünglichen Gestalt – gegeneinander verschoben werden, um somit die Mindestabstände, und damit die Lesbarkeit zu garantieren.

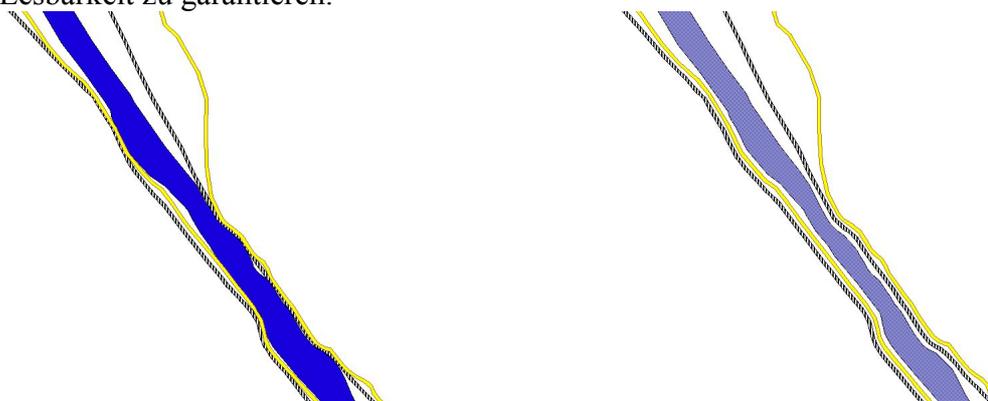


Abbildung 5: Verdrängung von Fluss, Eisenbahn und Strassen, vor der Verdrängung (links), danach (rechts).

Abbildung 6 schließlich zeigt eine kombinierte Anwendung beider Generalisierungsverfahren: die Integration eines ALK Gebäudebestands in einen ATKIS Datensatz. Zunächst werden die Gebäude vereinfacht. Anschließend werden sie in das bestehende Straßennetz integ-

riert. Hierbei wird die ATKIS Situation, welche in diesem Falle die Referenz darstellt, festgehalten, d.h. die Strassen wurden als fix angenommen, und die Gebäude werden verschoben. Als Ergebnis erhält man eine deutlich ruhigere, weniger dichte und komplexe Darstellung der gesamten Situation (Abbildung 6, rechts).

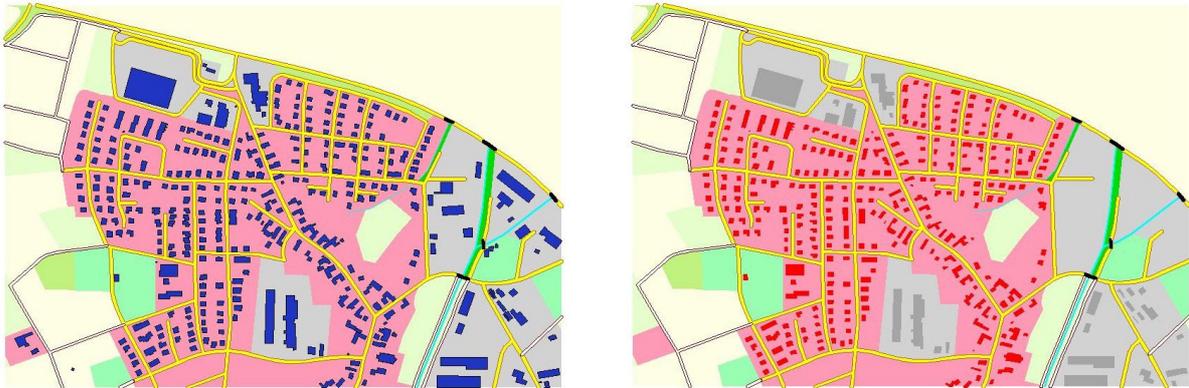


Abbildung 6: Integration von ALK Gebäuden in einen ATKIS Datenbestand. Links: Situation vor der Generalisierung. Rechts: Situation nach Gebäudevereinfachung und Verdrängung.

3.2.1 Bewertung

Der Ansatz zeichnet sich insbesondere dadurch aus, dass das Ergebnis in einem Guss erzeugt wird, d.h. die Situation als Ganzes optimiert wird. Dies stellt einen entscheidenden Vorteil gegenüber anderen Optimierungstechniken dar, wo u.U. durch Lösen eines Konflikts neue Folgekonflikte erzeugt werden. Wichtig ist zudem, dass nur ein Parameter benötigt wird, die minimale Distanz zwischen Objekten. Auch zeichnet das Verfahren besonders aus, dass sowohl linien- als auch flächenhafte Objekte verarbeitet werden können.

Das Verfahren setzt voraus, dass bereits andere Generalisierungsschritte vorangegangen sind, z.B. Vereinfachung und Reduktion. Wurde keine Reduktion der Objektmenge durchgeführt, so steht zu wenig Platz für alle Objekte zur Verfügung, was zum einen dazu führt, dass Objekte deformiert (zusammengedrückt) werden. Zum anderen kann es dazu führen, dass die Objekte eventuell zu stark verschoben werden – in die Randbereiche, in denen noch Freiflächen vorhanden sind. In manchen Fällen führt dies dazu, dass Objektgruppen (Cluster) hiermit zerstört werden, was das Wiedererkennen der Situation verhindert. Hierzu sind Verfahren nötig, welche zunächst Cluster erkennen, diese separat ausdünnen, und anschließend verdrängen. Für das Problem der Identifikation von Clustern wird derzeit ein Verfahren entwickelt, welches parameterfrei arbeitet, und „natürliche“ räumliche Cluster ermittelt (Anders et al., 1999).

4 Zusammenfassung

Ausgleichung stellt ein sehr wirksames Werkzeug dar, welches für verschiedene Generalisierungsprobleme sinnvoll eingesetzt werden kann. Besonders die Möglichkeit der Qualitätsbeurteilung des Ergebnisses ist für die Automation von großer Bedeutung. Diese versetzt den Operateur in die Lage, das Ergebnis sehr schnell zu analysieren und mögliche Konsequenzen daraus zu ziehen.

Zukünftige Arbeiten zielen darauf ab, weitere Generalisierungsoperatoren mit der Methode zu bearbeiten. Die Operatoren Aggregation und Betonen lassen sich direkt in den Verdrän-

gungsansatz integrieren. Typisieren bedarf einer vorangehenden Strukturerkennung mittels Clusterverfahren, sowie einer gemeinsamen Verdrängung von Objektgruppen.

5 Literaturverzeichnis

- Anders, K.-H., M. Sester & D. Fritsch (1999): Analysis of Settlement Structures by Graph-Based Clustering, *in: SMATI 99, Workshop 'Semantic Modeling', Munich, Germany.*
- Bobrich, J. (1996), *Ein neuer Ansatz zur kartographischen Verdrängung auf der Grundlage eines mechanischen Federmodells*, Vol. C455, Deutsche Geodätische Kommission, München.
- Burghardt, D. & Meier, S. (1997) 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, Seiten 114–120.*
- Harrie, L. E. (1999), 'The Constraint Method for Solving Spatial Conflicts in Cartographic Generalization', *Cartography and Geographic Information Science* **26** (1), Seiten 55–69.
- 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.*
- Jäger, E. (1990), *Untersuchungen zur kartographischen Symbolisierung und Verdrängung im Rasterdatenformat*, Institut für Kartographie, Universität Hannover, Nr. 167.
- Lee, D. (1999), New Cartographic Generalization Tools, *in: 'Proc. ICA', International Cartographic Association, Ottawa, Canada.*
- Regnault, N., Edwardes, A. & Barrault, M. (1999), Strategies in Building Generalisation: Modelling the Sequence, Constraining the Choice, Third Workshop on Progress in Automated Map Generalization, 12.-14. August, 1999, Ottawa, Canada, http://www.geo.unizh.ch/~barrault/WSHOP_ACI/workshop.htm.
- Ruas, A. (1998), A method for building displacement in automated map generalization, *International Journal of Geographical Information Science* **12** (8), Seiten 789–803.
- Sarjakoski, T. & Kilpelainen, T. (1999), Holistic Cartographic Generalization by Least Squares Adjustment for Large Data Sets, *in: 'Proc. ICA', International Cartographic Association, Ottawa, Canada.*
- Sester, M. & Förstner, W. (1989): Object Location based on Uncertain Models, *in: Mustererkennung 1989, Vol. 219 of Informatik Fachberichte, Springer Verlag, Hamburg, Seiten 457-464.*
- Sester, M. (1999), Rule Based Generalization of Buildings for 3D-Visualization, *in: 'Proc. ICA', International Cartographic Association, Ottawa, Canada.*
- Staufenbiel, W. (1973), *Zur Automation der Generalisierung topographischer Karten mit besonderer Berücksichtigung großmaßstäbiger Gebäudedarstellungen*, Institut für Kartographie, Universität Hannover, Nr. 51, 1973.
- Ware, J. & Jones, C. (1998), 'Conflict Reduction in Map Generalization Using Iterative Improvement', *GeoInformatica* **2** (4), 383–407.