

Kapitel 4

RASTERGEOMETRIE UND RASTERALGEBRA

4.1 Rasterdaten

4.1.1 Übersicht

Geometrische Sachverhalte sind in Rastermodellen um vieles einfacher darzustellen als in Vektormodellen (siehe Abb. 2.6). Es gibt nur einen Entitätstyp, ein geometrisches Element im Rastermodell, die *Rasterzelle* oder *Rastermasche*, in Anlehnung an die Anwendungen in der graphischen Datenverarbeitung und der Bildverarbeitung als *Pixel* bezeichnet. (Die dreidimensionale Verallgemeinerung ist das *Voxel*.)

Die Rasterzelle ist rechteckig und überdeckt ein Gebiet mit homogener Bedeutung. Alle Rasterzellen sind gleich groß und unterliegen einer regelmäßigen Anordnung. In einem *Fernerkundungsbild* etwa kann man die Rasterzellen zur Darstellung homogener Grau- oder Farbwerte heranziehen. Wir haben aber bereits in Kapitel 2 darauf hingewiesen, daß es auch allgemeinere Bedeutungen geben kann, denen man eine Rasterung zugrunde legt, wie zum Beispiel diverse Statistiken, die relativ grob für rechteckige Bereiche gegeben sind (Waldschäden, Niederschlag, Infrastruktur). Aber auch ein *digitales Geländemodell* (DGM) wird häufig in dieser Form angelegt; für jede Zelle (z.B. $30 \times 30 \text{ m}$) liegt ein Höhenwert vor, der die durchschnittliche Höhe in der Zelle angibt. Die Höhe für einen Punkt kann dann etwa direkt von der darüberliegenden Zelle übernommen werden, oder man interpoliert aus einer Umgebung von mehreren Zellen (siehe Kap. 5); formal ist dies dann nichts anderes als eine Grauwertfilterung.

Die Rasterung des Interessensgebietes stellt einen Spezialfall einer mosaikartigen Aufteilung dar und ist den *feldbasierenden* Ansätzen der Modellierung zuzurechnen (siehe Kap. 2 und Abb. 2.5). Das *Mosaik* (engl. *tesselation*) kann auch aus Dreiecks- oder Sechseckszellen bestehen, ja, es muß nicht einmal unbedingt regelmäßig sein. In Kapitel 3 haben wir die Bezeichnung *Mosaik* für

eine beliebige netzartig aufgeteilte Struktur von Flächen verwendet. Ein *dreiecksvermaschtes Höhenmodell* (TIN bzw. *triangulated irregular network*) stellt einen allgemeinen Fall eines solchen Mosaiks dar (siehe auch Kap. 5). In diesem Kapitel jedoch wollen wir eine regelmäßige und sogar rechteckige Rasterung voraussetzen.

Rasterdaten sind in GI-Anwendungen in immer größerem Ausmaß vertreten. Sie werden innerhalb der von ISO/TC 211 *Geographic Information / Geomatics* erstellten Normenfamilie in den Technischen Berichten bzw. Normen ISO 19121 ‘Imagery and Gridded Data’, 19124 ‘Geographic information - Imagery and gridded data components’, 19129 ‘Geographic information - Imagery, gridded and coverage data framework’ und 19130 ‘Geographic information - Sensor and data models for imagery and gridded data’ [269] abgedeckt. Von dort entnehmen wir auch eine Aufstellung unterschiedlicher Kategorien als Beispiele für Rasterdaten:

VIS	Visible Imagery	SAR	Synthetic Aperture Radar
SL	Side Looking Radar	SARIQ	SAR Radio Hologram
TI	Thermal Infrared	IR	Infrared
FL	Forward Looking Infrared	MS	Multispectral
RD	Radar	MAP	Raster Maps
EO	Electro-Optical	LEG	Legends
OP	Optical	PAT	Colour Patch
HR	High Resolution Radar	DTEM	Matrix Data (DGM)
HS	Hyperspectral	MATR	Matrix Data (other)
CP	Colour Photography	LOCG	Location Grid
BP	Black/White Photography		

In dieser Tabelle wird ersichtlich, daß uns Rasterdaten in GI-Anwendungen aus mehreren Gründen interessieren:

- *Rohdaten* als Ausgangsmaterial für Datengrundlagen in GI-Anwendungen liegen immer öfter im Rasterformat vor. Aus diesen Ausgangsdaten gewinnen wir Geodaten, indem wir sie scannen und daraufhin Bildverarbeitungsalgorithmen verwenden. Die meisten Beispiele dieser Tabelle beschreiben solche Datenkategorien.

- Rasterdaten können als Attribute zu GI-Objekten auftreten. Ein gesamtes Bild kann – beispielsweise als photographische Dokumentation einer Situation – als *Binary Large Object* (BLOB; siehe Kapitel 9) definiert werden.

- Regelmäßig angeordnete Höhenangaben für Geländemodelle oder auch andere in der Tabelle als Matrix Data und Location Grids klassifizierte Daten stellen selbst wichtige Primärinformationen in Geoinformationssystemen dar. Alle Arten von Messungen, die für einen regelmäßigen Raster interpoliert werden, fallen in diese Kategorie. Beispiele sind Bodenproben, Schadstoffbelastungen

oder Niederschlag. Mit Hilfe der in diesem Kapitel angebotenen Algorithmen lassen sich daraus eine Vielzahl von abgeleiteten Informationen gewinnen.

- Wenn nicht nur ein Layer, sondern das gesamte Informationssystem auf dem Rastermodell beruht, sprechen wir von einem *Raster-GIS*, einer besonders einfachen Spielart eines Informationssystems. Die in diesem Kapitel behandelte Rasteralgebra stellt ein mächtiges Werkzeug für Raster-GIS dar.

Daten der ersten hier erwähnten Kategorie (Rohdaten) und der zweiten Kategorie (Binary Large Objects) werden in vielerlei Formaten angeboten. In ISO 19121 werden die folgenden Codierungsformate erwähnt:

- *JPEG (Joint Photographic Experts Group)*: Das Format heißt eigentlich JFIF (JPEG File Interchange Format), es hat sich jedoch der Name der Gruppe eingebürgert, die es entworfen hat. Es wird in der Norm ISO/IEC 10918 definiert und komprimiert Bilder (manchmal verlustfrei) in Verhältnissen bis zu 1:35. Die Erweiterung auf bewegte Bilder heißt MPEG. Die Norm ISO/IEC 13818 MPEG-2 integriert sogar Audio-Information. Noch einen Schritt weiter geht ISO/IEC 13522 MHEG-2 für Multimedia- und Hypermedia-Erweiterungen.

- *GIF (Graphic Interchange Format)*: Dieses Format wurde von CompuServe entwickelt und verwendet den patentierten Komprimierungsalgorithmus LZW.

- *BIFF (Basic Image Interchange Format)*: Die Norm ISO/IEC 12087-5 definiert diese Schnittstelle, die eine ganze Reihe von Formaten wie etwa JPEG, aber auch CGM (Computer Graphics Metafile) und PIKS (Programmer's Imaging Kernel System) unterstützt.

- *PNG (Portable Network Graphics)*: Dies ist ein allgemein zugängliches ('public domain') Format, das als Gegengewicht zu GIF und seinen Patentierungen vom World Wide Web Consortium (W3C) entwickelt wurde. Ihm liegt ein verlustfreier Komprimierungsalgorithmus zugrunde. Man erwartet daß PNG letztlich GIF und auch TIFF an Bedeutung überflügeln wird.

- *Photo Compact Disk*: Eastman Kodak Ltd. hat dieses Format für die Speicherung auf CD von Photos in hoher Qualität entwickelt.

- *Fractal Transform Coding*: Dies ist eine patentierte Codierungstechnik, die von Microsoft in Multimediatechniken angewendet wird. Der Algorithmus basiert auf der Rekonstruktion von Attraktoren der Chaos-Theorie und kann Bilder in Verhältnissen von 1:10 000 bis 1:1 000 000 komprimieren [9]. Dies allerdings nicht gänzlich verlustfrei, sodaß bei der Rekonstruktion nicht unbedingt wieder das ursprüngliche Bild entsteht.

- *TIFF (Tag Image File Format)*: Dieses Format hat sich vor allem beim Austausch von Scandokumenten und im Electronic Publishing etabliert. Es definiert Tags (das englische Wort für Etiketten) für verschiedene Arten der

Kodierung und erlaubt neben den Standardetiketten, die eine Komprimierung für LZW, Fax oder JPEG erlauben, auch ‘private’ Etiketten. Dieser Umstand trägt zwar zum Komfort bei, hat aber auch zu teilweise inkompatiblen Implementierungen geführt. Trotzdem ist eine dieser Erweiterungen – GEO TIFF – wichtig für GI-Anwendungen. Es hängt zum allgemeinen TIFF-Format Metadaten über die verwendeten Bezugssysteme hinzu, sodaß es die Interoperabilität in dieser Hinsicht unterstützt (siehe Kapitel 10). Ein GEO TIFF Bild kann dann automatisch georeferenziert in eine GI-Anwendung eingepaßt werden.

4.1.2 Rastergeometrie

Sind die Abmessungen einer Rasterzelle einmal festgelegt und ein Bezugspunkt und eine Bezugsrichtung des Rasters gefunden, so sind damit auch viele geometrische Probleme aus der Welt geschafft. Positionen, Distanzen und Winkel sind leicht in ganzzahlige Vielfache der elementaren Zellengröße umzurechnen; die Zeilen- und Spaltenposition der jeweiligen Zelle ist daraus ableitbar. Außerdem ist eine Rasterzelle eine flächige Struktur; daraus folgt, daß viele wichtige geometrische Abfragen, die Flächen betreffen (z.B. ein Lagevergleich), leicht durch Summation, Differenz oder logische Vergleiche von Elementarflächen (Zellen) befriedigt werden können; im Vektormodell sind dafür recht aufwendige Operationen nötig (Kap. 3). Es gibt jedoch auch Gegenbeispiele: Koordinatentransformationen sind im Vektormodell einfacher als im Rastermodell durchzuführen; dies rührt von der starren Nord-Süd- bzw. West-Ost-Ausrichtung der Rasterzellen her. Wir erwähnen

- Übergänge zwischen *geodätischen* und *kartesischen* Koordinaten;
- *überbestimmte Helmert-Transformation* mit *Paßpunkten*;
- *Zusammenlegung* aneinandergrenzender oder überlappender Bilder;
- *Randausgleich* und *Entzerrungen*.

So müssen wir zum Beispiel Fernerkundungsbilder entzerren; der Effekt der Erdrotation ist zu berücksichtigen: Während der Aufnahme dreht sich die Erde weiter, so daß sowohl das Gitter als auch das einzelne Pixel nicht mehr rechteckig ist. Diese Problematik und die entsprechenden Lösungsmöglichkeiten werden in [152] behandelt.

Manchmal wird der Begriff *Transformation* auch nur auf jenen Teilbereich beschränkt, wo wir eines der beiden Systeme noch gar nicht kennen, sondern erst aufgrund der Paßpunktinformation ermitteln wollen. Die Überführung vorgegebener Koordinaten in andere – ebenso vorgegebene – Koordinaten jedoch (wobei Grauwerte entsprechend mitgeführt werden sollen) nennt man *re-sampling*. Für eine geometrische Transformation müssen wir die Koordinaten (x, y) der

Rasterzellen eines Bildes in Koordinaten (x', y') eines anderen Bildes umrechnen:

$$x' = f(x, y) \quad y' = g(x, y) \quad (4.1)$$

Wir können uns so behelfen, daß wir für jede Rasterzelle (x', y') des transformierten Bildes alle Rasterzellen (x, y) des ursprünglichen Bildes sowie auch deren Grauwerte ermitteln und den Grauwert an der Stelle (x', y') dementsprechend – etwa durch Mittelung – festsetzen. Das bedingt natürlich, daß wir die Umkehrabbildung kennen; dies kann zeitaufwendig sein. Zeitsparende Algorithmen werden in [217] vorgestellt.

Transformationen sind nicht die eigentliche Hürde bei Rastermodellen: Der entscheidende Engpaß ist die erreichbare Genauigkeit. So gilt als Faustregel, daß sich die *räumliche Auflösung (sampling)* bei einer Rasterung nach dem kleinsten Element richtet, das noch dargestellt werden soll. Eine elementare Zelle soll halb so groß wie dieses Element sein. Wenn also auf einem Fernerkundungsbild Straßen mit einer Breite von 6 m noch erkennbar sein sollen, so müssen Zellen der Größe $3\text{ m} \times 3\text{ m}$ gewählt werden. Ein Bild, das einen Bereich von $30\text{ km} \times 30\text{ km}$ überdeckt, enthält demnach 10^8 Pixel. Erlaubt man in jedem Pixel 256 Grauwerte – dies beschreibt die *Grauwertauflösung (Quantisierung)* –, so ergibt sich ein Speicherbedarf von 2,5 Gigabyte. Dies läßt sich zwar durch Verwendung geeigneter Komprimierungstechniken reduzieren; trotzdem aber stellt dieser enorme Platzbedarf immer noch das größte Hindernis für eine globale Anwendung des Rastermodells dar.

Für den topologischen Zusammenhang eines Rastermodells gibt es – so wie beim Vektormodell – eine Reihe von Bausteinen, auf welche wir in der Folge näher eingehen. Es sind dies elementare Zellen (Pixel) und Pixelanhäufungen, Ketten und baumartige Strukturen. Sie sind nicht so differenziert wie beim Vektormodell, was sowohl als Vorteil (größere Einfachheit der Algorithmen) als auch als Nachteil (Einschränkung der Allgemeinheit) empfunden werden kann. Linienhafte Strukturen sind in einem Rastermodell nur als zusammenhängende Folgen von Rasterzellen darstellbar. Ausgehend von einer Anfangszelle wird die Adresse (also Zeilen- und Spaltennummer) der nächstfolgenden Zelle vermerkt. Dabei kann man verschiedene Metriken zugrunde legen. So kennt man etwa in der *Häuserblockmetrik* (oder *Manhattan-Metrik*, in Anlehnung an das Bild amerikanischer Großstädte) nur vier Nachbarn NORD, OST, SÜD, WEST (Abb. 4.1a), während in der *Schachbrettmatrix* auch die Himmelsrichtungen NORDOST, SÜDOST, SÜDWEST und NORDWEST möglich sind (Abb. 4.1b). Ordnen wir nun jeder Himmelsrichtung eine Zahl zu, so können wir linienhafte Strukturen durch eine Anfangsposition (Zeilen- und Spaltennummer) und durch eine darauffolgende Zahlenkette modellieren. Diese Strategie wird als *Kettencodierung (chain coding)* bezeichnet.

Sind die Strukturen streng in horizontaler oder vertikaler Richtung angeordnet, so wird oft auch eine *Lauf längencodierung (run length encoding)* durchgeführt.

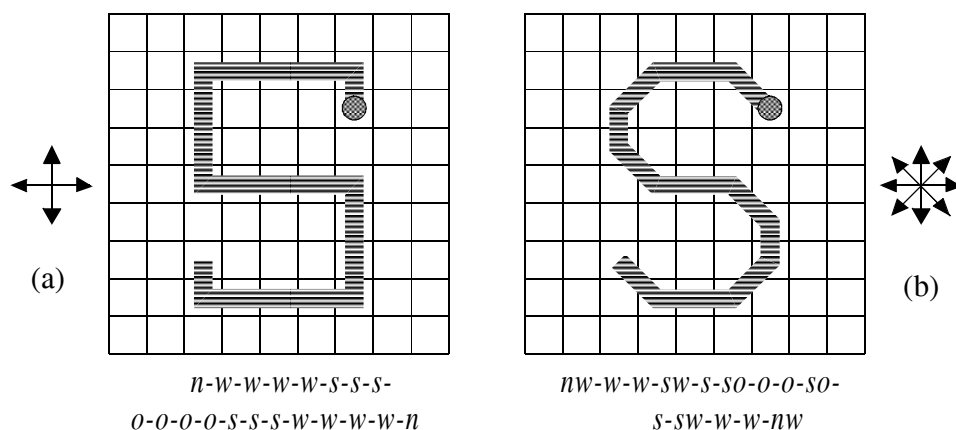


Abbildung 4.1: Rastermetrik und Kettencode: (a) Manhattan; (b) Schachbrett

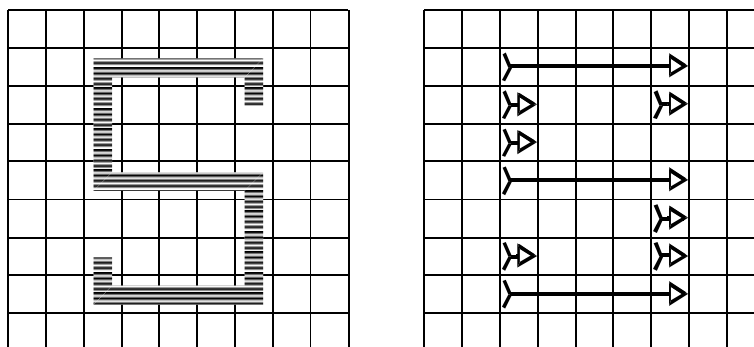


Abbildung 4.2: Lauflängencodes für Rasterzellen

Dabei nutzt man den Umstand aus, daß aneinanderstoßende Zellen sehr oft auch den gleichen Grauwert – stellvertretend für die gleiche Bedeutung – besitzen. Jedesmal, wenn eine Bedeutung wechselt, genügt es daher, die neue Bedeutung und die Anzahl der darauffolgenden Zellen mit dieser Bedeutung zu speichern (Abb. 4.2). Flächige Sammlungen von Rasterzellen werden effizient durch eine *Baumstruktur* modelliert (Abb. 4.3). Dabei werden Konzepte angewandt, die auch den Überlegungen in Kapitel 8 zugrunde liegen. Allerdings gibt es hier jeweils nur zwei Alternativen für die Belegung einer Zelle: JA, d.h. sie gehört zur Struktur, die modelliert werden soll, oder NEIN, d.h. sie gehört zum Hintergrund.

Natürlich können wir Flächen auch – ähnlich wie in Vektormodellen – durch ihren *Rand* darstellen. Dieser Rand kann seinerseits etwa durch Kettencodes modelliert werden, ebenso wäre die Einbeziehung von *Aussparungen (Inseln)* durch die Einführung *innerer Ringe* möglich. Diese Art der Darstellung nutzt jedoch die Möglichkeiten des Rastermodells zu wenig aus und wird selten angewandt. Ganz anders jedoch das *Skelett* (Abb. 4.4). Wir bezeichneten das Skelett bei der Besprechung des Vektormodells (Kap. 3) als eine interessante –

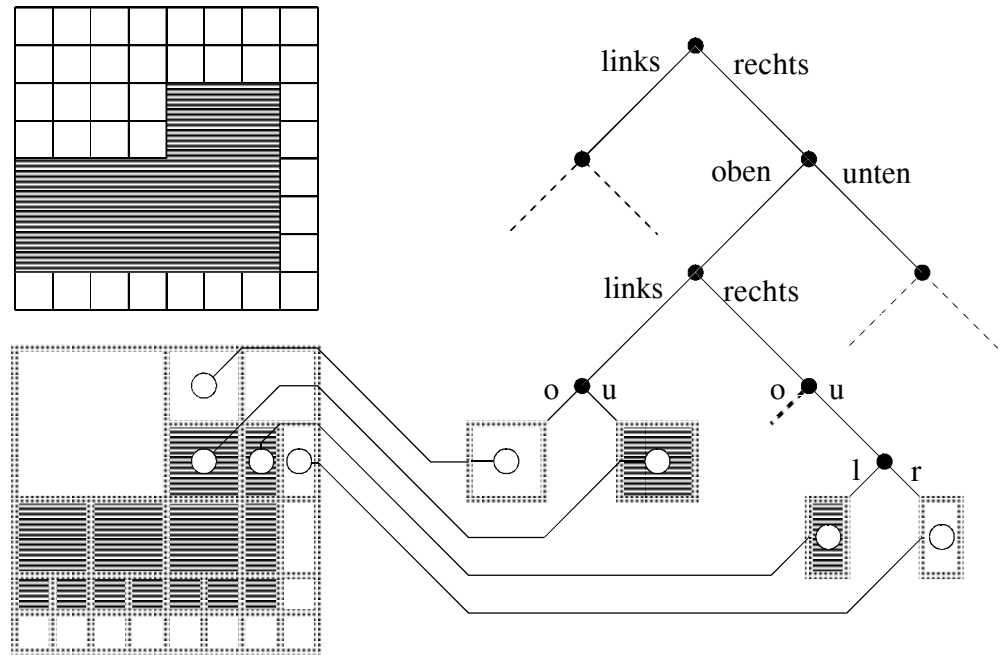


Abbildung 4.3: Baumstruktur zur Modellierung eines flächigen Phänomens

wenn auch seltener gewählte – Alternative. Im Rastermodell ist das Skelett eine effiziente Kurzdarstellung einer Fläche, ein stenographisches Kürzel, aus dem sich die ursprüngliche Fläche mittels einfacher und automatisierbarer Operationen rekonstruieren läßt. Wir werden auf diese Operationen in den nächsten Abschnitten näher eingehen. Das Skelett kann seinerseits wieder durch eine Baumstruktur bzw. einen verallgemeinerten Kettencode repräsentiert werden.

4.1.3 Hybride Modelle

In Kapitel 2 stellten wir Vektor- und Rastermodelle einander gegenüber und wogen die Vor- und Nachteile ab. Weitere Argumente wurden in Kapitel 3

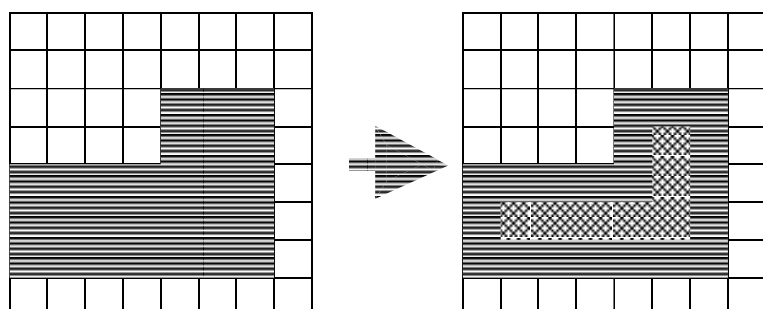


Abbildung 4.4: Skelett einer Fläche im Rastermodell

und in den vorangegangenen Abschnitten gesammelt. Wir stellten fest, daß die Stärke von Rastermodellen in ihrem flächenhaften Aspekt und in der Einfachheit ihrer Geometrie liegt. Vektormodelle hingegen zeichnen sich durch die hohe Genauigkeit aus, die sie ermöglichen, sowie durch eine beliebig steigerungsfähige Komplexität in den Beziehungen der einzelnen Elemente. Bei den Operationen, die wir auf diese Modelle anwenden, gibt es auch wieder solche, die besser mit dem Rastermodell harmonieren (wie etwa Lagevergleiche und Verschneidungen) und andere, die eher dem Vektormodell angepaßt werden können (wie beispielsweise Koordinatentransformationen).

Die Vorteile beider Modelle können in einem *hybriden Modell* kombiniert werden. Eine Einführung in die Problematik hybrider Modelle findet man in [150] und [124]. Unter diesem recht allgemeinen Begriff eines hybriden Modells lassen sich mehrere Strategien einordnen. So können wir zunächst darunter die *Überlagerung* von unterschiedlich strukturierten *Layers* verstehen. In vielen GI-Anwendungen kommen sowohl Themen vor, die sich besser für eine Modellierung nach dem Vektorprinzip eignen, als auch solche, die dem Rasterprinzip näherstehen. Es ist also ohne weiteres denkbar, daß bestimmte Layers vektormäßig und andere rastermäßig verwaltet werden. Für ein Fahrzeugleitsystem etwa gilt dies für die Ebene des Straßennetzes einerseits und die Ebene des kartographisch aufbereiteten Hintergrundes andererseits. Ein solcher *elektronischer Atlas* liefert Bilder von hoher Aussagekraft (siehe [206], [140]). Eine andere Anwendungsmöglichkeit ergibt sich durch die Hinterlegung einer digitalen Stadtkarte mit Orthophotos (siehe [109], [110]). Dieses Prinzip der gleichzeitigen Verwendung von Vektor- und Rasterdaten kann im Detail noch verschiedene Ausprägungen haben:

- Simultane Bereitstellung von Vektor- und Rasterbildern am Bildschirm.
- Deckungsgleiches Übereinanderblenden.
- Teilweise, dem Bedarf angepaßte Rasterung von Vektordaten bzw. Vektorisierung von Rasterdaten.

Im ersten Fall wird kein vom System nachvollziehbarer Bezug zwischen Bildteilen, höchstens zwischen ganzen Bildern, hergestellt. Durch die gleichzeitige Darbietung graphischer Inhalte wird jedoch die menschliche Fähigkeit des assoziativen Denkens, Vergleichens und Schließens sehr effizient angesprochen. Kommen dann noch Video- und Audio-Einspielungen hinzu, so ist die *Multi-Media-Welt* vollkommen. Ein digitaler Stadtplan etwa mit eingeblendeten Nahaufnahmen von Gebäuden und mit gesprochenen, erklärenden Texten, für die man mittels Mausclick die jeweils bevorzugte Sprache wählt, stellt ein gelungenes Beispiel für diese Variante dar. Entsprechende Ansätze werden in [140] vorgestellt.

Der zweite Fall des deckungsgleichen Übereinanderblendens stellt eigentlich nur einen Ausbau der ersten Variante dar, indem ein Bild durchsichtig gemacht

wird, so daß es über das andere geschoben werden kann, ohne dieses zu verdecken. Natürlich wird man das Vektorbild über das Rasterbild schieben. So kann man etwa ein mit Rastertechnologie erzeugtes Geländemodell bzw. dessen Varianten (siehe Kap. 5) mit der im Vektor-GIS gespeicherten Situation überblenden. Man kann auch den Spieß umdrehen und etwa Höhenlinien einem Orthophoto überlagern.

Zum letzten Punkt (teilweise, bedarfsorientierte Integration) ist festzuhalten, daß es sich dabei um eine – was die Ressourcen eines GIS angeht – besonders ökonomische Variante handelt. Wenn wir bedenken, welche Datenmengen in einem Fernerkundungsbild enthalten sind und wie gering der Prozentsatz jener Daten ist, die wir für die aktuelle Anwendung tatsächlich brauchen, so erscheint es vernünftig, lediglich diesen Prozentanteil aus dem Rasterbild zu extrahieren bzw. zu vektorisieren und in das GIS einfließen zu lassen; das restliche Bild wird archiviert und ist mit dem GIS nur über seine Kennung verknüpft. In [110] wird ein Verfahren vorgestellt, das diese Methode dazu benutzt, um rasch und einfach Änderungen der Nutzung städtischer Parzellen anhand von Orthophotos und einem zugrundeliegenden Vektor-GIS festzustellen.

Ein hybrides Modell, das einen Schritt weiter geht, *integriert* die unterschiedlichen Datentypen unter einem gemeinsamen Dach. Die Zellen des Rastermodells sind mit Werten belegt, die wir als *Grauwerte* bezeichnen, weil dieser Begriff auch in vielen GI-Anwendungen wörtlich genommen werden kann. Fernerkundungsbilder haben zuzüglich zur *räumlichen Auflösung (sampling)* auch eine *thematische* oder *Grauwertaupflösung (Quantisierung)*. Anstatt einer kontinuierlichen Grauwertverteilung treten einige wenige diskrete Werte auf. Im Kontext der Geoinformation verallgemeinern wir den Bedeutungsinhalt für den Grauwert. Er ist nicht mehr ausschließlich eine visuell erfaßbare Größe, sondern steht für eine inhaltliche Aussage. Dafür wurden bereits Beispiele wie die Geländehöhe, die durchschnittliche Niederschlagsmenge, der Waldbestand, die Luftgüte und das Pro-Kopf-Einkommen gegeben. Es sind dies thematische Aussagen. Was nun, wenn wir pro Rasterzelle mehrere – unter Umständen in ihrer Form recht heterogene – Aussagen verwalten müssen? Eine Möglichkeit besteht darin, den Grauwert dieser Zelle als *Zeiger (pointer)* in eine *Sachdatei* zu verwenden. Erst dort finden wir dann ausführliche – dem Vektormodell nahestehende – thematische Beschreibungen (Attribute) der jeweiligen Rasterzelle (Abb. 4.5a).

Als weitere Möglichkeit steht eine Objektbildung im Rasterbild zur Diskussion, die einen inhaltlichen Zusammenhang zwischen – möglicherweise auch disjunkten – Rasterzellen herstellt. Jedes Objekt wird in diesem Fall mit einer Rasterzelle identifiziert, deren Lage für das jeweilige Objekt charakteristisch ist, also etwa im ungefähren Schwerpunkt des Objektes. Diese Rasterzelle wird als *Zentroid* bezeichnet (Abb. 4.5b). Alle anderen Rasterzellen, die zu demselben Objekt gehören, erhalten einen Zeiger zu diesem Zentroid, der formal wieder wie ein Grauwert behandelt wird. Natürlich stellt auch hier der vorhandene Speicherplatz eine Schranke dar, so daß nur einfache Themen in dieser

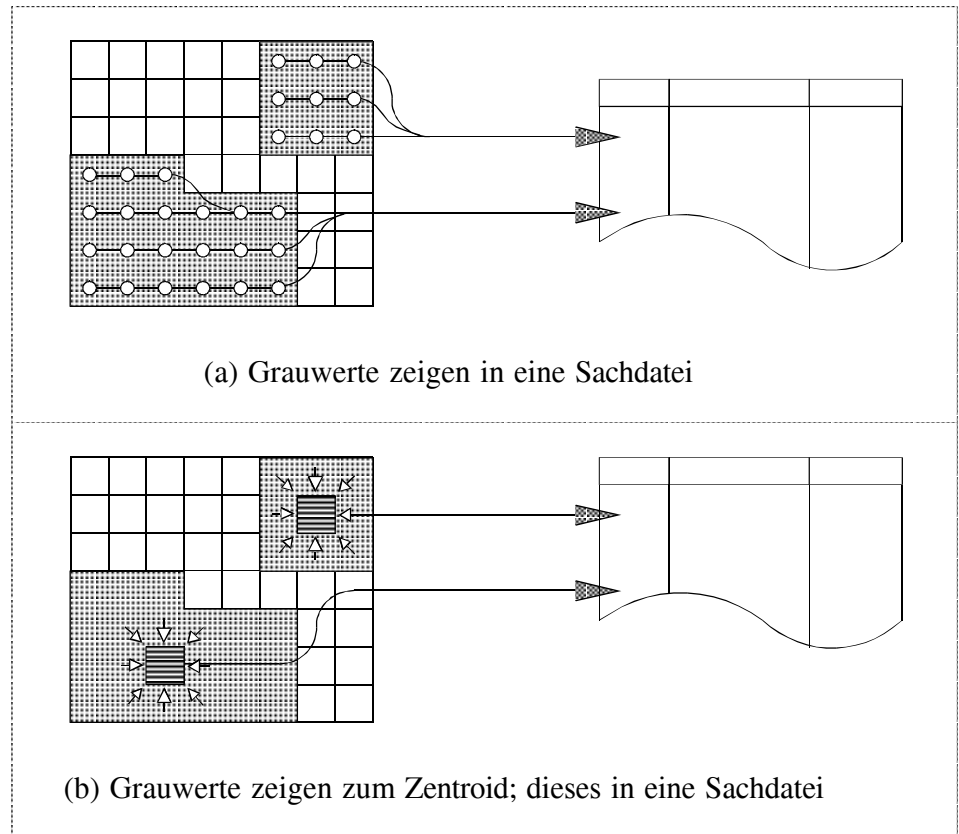


Abbildung 4.5: Integriertes hybrides Modell

Weise abgehandelt werden können. Die Stoßrichtung läßt sich auch umkehren, indem man zu Punkten, Linien bzw. Flächen im Vektormodell Attribute definiert, deren Werte als Zeiger in ein System zur Verwaltung von Rasterbildern interpretiert werden. Diese Rasterbilder können dann auf Wunsch in einem Multi-Media-Umfeld eingeblendet werden. Für allgemeine diesbezügliche Überlegungen sei auf [124] verwiesen.

4.2 Methoden der Rastergeometrie

Viele geometrische Methoden im Umfeld von Rastermodellen können auf eine relativ kleine Anzahl von *Grundfunktionen* zurückgeführt werden. Diese Funktionen der Rasterdatenverarbeitung zeichnen sich gegenüber Vektoroperationen (etwa den in Kap. 3 besprochenen Lagevergleichen) durch ihre extreme Einfachheit aus. Ihr Nachteil besteht hauptsächlich in der großen Anzahl von Schritten, die für die Bearbeitung eines gesamten Bildes notwendig sind. Erst in letzter Zeit ist es durch die Leistungssteigerung der Hardware möglich geworden, die theoretischen Vorgaben auch in die Praxis umzusetzen.

Angesichts der Vor- und Nachteile, die beide Strategien – sowohl Vektor wie auch Raster – aufweisen, kann man weder der einen noch der anderen Methode grundsätzlich den Vorzug geben; jede kann in dem ihr gemäßen Umfeld optimal operieren, und aus diesem Grund gibt es kein *Entweder-oder*, sondern vielmehr ein *Nebeneinander*, wo die beiden Strategien einander ergänzen. Nicht zuletzt können Rasterdaten in Vektorform übergeführt werden und umgekehrt.

Es sei erwähnt, daß die im folgenden vorgestellten Basisoperationen aus der Bildverarbeitung stammen. Viele Bezeichnungen sind deshalb auch Entlehnungen aus deren Terminologie. So spricht man vom *Spektrum* der Grauwerte, von hohen und niedrigen *Frequenzen* usw. Eine detaillierte Darstellung der Methoden der digitalen Bildverarbeitung wird hier nicht beabsichtigt. Für eine Einführung in dieses umfangreiche Forschungsgebiet – das auch bereits mit beachtlichen Ergebnissen aufwarten kann – sei auf [176], [105] und [8] verwiesen. Wenn wir jedoch für unsere Zwecke einige Algorithmen herausgreifen, so werden wir sehen, daß diese genauso gut für Bearbeitung und Analyse thematischer Daten verwendbar sind – wie ja überhaupt die Thematik in Rastermodellen von der Geometrie kaum streng getrennt werden kann. Die thematische Kartographie kann sich also dieser Methoden bedienen und damit brauchbare Ergebnisse erzielen. Eine gute Einführung in Rastermethoden der Kartographie bieten [78] und [87].

Der nächste Abschnitt stellt kurz einige elementare Operationen vor; in den weiteren Abschnitten werden dann *Makro-Operationen* behandelt, die sich dieser elementaren Werkzeuge bedienen.

4.2.1 Elementare Operationen

Eine der wichtigsten Methoden der Rasterdatenverarbeitung ist die *radiometrische Transformation*: Eine *Transferfunktion* wird auf die Grauwerte aller Zellen eines Rastermodells angewendet. (Man beachte, daß im Sinne unserer bisherigen Überlegungen der Grauwert auch eine thematische Bedeutung haben kann, wie etwa das Mittel der Geländehöhe in einem vorgegebenen Rechteck oder der Jahresdurchschnitt an Niederschlag; wir werden in Zukunft von Grauwerten sprechen und deren etwaige allgemeinere Bedeutung stillschweigend voraussetzen.) Eine mögliche Transferfunktion wäre $y = 2 \times x$: Sie würde in jeder Rasterzelle den Grauwert verdoppeln (Abb. 4.6a). Dies ist etwa dann sinnvoll, wenn man das Spektrum der Grauwerte spreizen will, weil sie sonst zu nahe beinander liegen, um optisch differenziert werden zu können. Meist jedoch kommt diese Operation als Teil einer Makro-Operation vor.

Die Transferfunktion muß nicht immer linear sein. Eine Funktion, die einen bestimmten Bereich des Spektrums (der ursprünglichen Grauwerte) unterdrückt und andere Bereiche hervorhebt, bezeichnet man als *Schwellwertbildung* (engl. *thresholding*; Abb. 4.6b). Alle Grauwerte unterhalb einer bestimmten Schranke werden zu Null; sie werden als ‘Störung’ abgetan, während die Grauwerte ober-

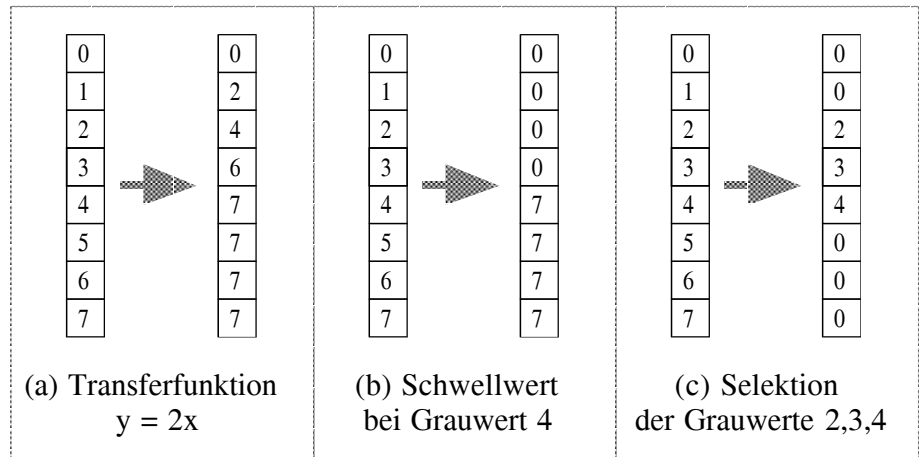


Abbildung 4.6: Radiometrische Transformation

halb dieser Schranke einen anderen konstanten Wert zugewiesen bekommen. So wird aus dem Grauwertbild ein Bild mit nur zwei verschiedenen Graustufen (*Zweistufenbild*). In unserem Fall würden wir wieder von zwei *thematischen* Bedeutungen sprechen. So könnten wir aus einem digitalen Geländemodell ein zweites ableiten, das nur mehr zwei Arten von Zellen hat, nämlich für Höhen unter 1000 m und für Höhen über 1000 m . Das Ergebnis einer solchen Transferfunktion liefert Ausgangsdaten für weitere Analysen (etwa Flächenbilanzen, Vergleich mit Waldzustandsdaten, Bergbauernkataster und ähnliches).

Eine dritte Variante der radiometrischen Transformation ist die *Selektion* eines bestimmten Bandes aus dem Spektrum (*slicing*). Die Grauwerte aus diesem Bereich werden unverändert übernommen; alles, was unterhalb oder oberhalb dieses Bereiches liegt, wird unterdrückt (Abb. 4.6c). Die graphische Umsetzung eines solchen aus dem DGM abgeleiteten Modells färbt dann etwa jene Gegenden ein, die zwischen 500 m und 1500 m Seehöhe liegen, und unterdrückt alle anderen Zellen.

Während die radiometrische Transformation in ihren verschiedenen Spielarten die Grauwerte – in unserem Fall die thematische Bedeutung – variiert und somit für bestimmte Analysen vorbereitet, verändern andere Grundfunktionen die Geometrie von Rasterbildern. Eine davon ist die *Translation* (Verschiebung); sie ist ein wichtiger Baustein für Makro-Operationen (Abb. 4.7a). Das Muster wird um einen bestimmten Betrag parallel verschoben, wobei dies in Nord-Ost-Süd-West-Richtung geschehen kann, aber auch – je nach der zugrundeliegenden *Metrik* – in andere Richtungen.

Arithmetische und logische Kombinationen von Rasterbildern sind weitere Beispiele für elementare Operationen. Bei der *arithmetischen* Kombination werden zwei Raster miteinander kombiniert; ihre Grauwerte werden pro Rasterzelle addiert, subtrahiert etc. und in einem Ergebnisraster eingetragen. Bei der (wichtigeren) *logischen* Kombination werden Grauwerte logisch miteinander verknüpft

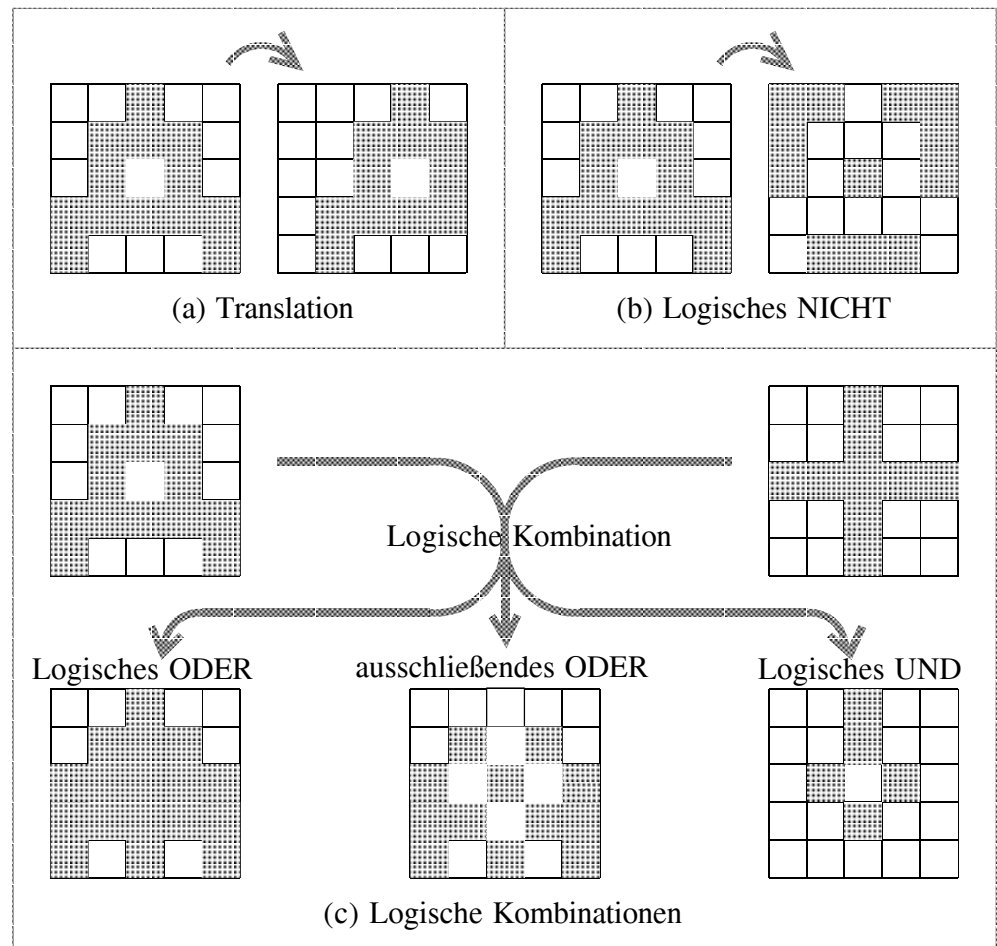


Abbildung 4.7: Beispiele für geometrische und logische Transformationen

(Abb. 4.7b-c). Beachten wir, daß man bei der logischen Kombination bereits von Zweistufenbildern ausgehen muß; die logischen Werte FALSCH und WAHR entsprechen den zwei möglichen Grauwerten pro Zelle. Die logische Kombination UND würde der Zelle des Ergebnisbildes genau dann den Wert WAHR zuordnen, wenn beide Ausgangsbilder in dieser Zelle WAHR sind. Die anderen logischen Kombinationen (ODER, ausschließendes ODER, NICHT) verlaufen analog.

4.2.2 Makro-Operationen

Eine der wichtigsten *Makro-Operationen*, die auf den oben erwähnten elementaren Methoden aufgebaut sind, ist die *Blow-shrink-Methode* (*Verdicken und Verdünnen*). Dabei wird das Ausgangsmuster verschoben, und zwar in alle Richtungen, die von der Metrik vorgegeben werden. Anschließend wird eine logische ODER-Kombination des Ausgangsbildes mit allen seinen Translationen durchgeführt. Das Verdünnen geschieht in der gleichen Art und Weise – nur daß wir

diesmal den Hintergrund verdicken. Aber wozu verdicken wir das Muster und machen dies wieder rückgängig, wo wir doch – im Groben gesehen – wieder das Ausgangsmuster erhalten? Wenn wir Abbildung 4.8 betrachten, so sehen wir, daß eine solche Prozedur kleine ‘Lücken’ zum Verschwinden bringt. Lücken in einem Rasterbild sind Zellen, deren Grauwerte aufgrund einer schlechten Scan-Vorlage bzw. aufgrund einer unzureichenden Schwellwertbildung entstehen. Solche Lücken verhindern beispielsweise eine Vektorisierung des Bildes, also einen Übergang zu einer Vektorstruktur. Sie verstümmeln auch thematische Zusammenhänge und sie sind ein Hindernis bei der Füllung von Flächen (eine weitere Makro-Operation, die wir weiter unten beschreiben). Das Füllen der Lücken ist also eine Vorbedingung für viele Rasteroperationen.

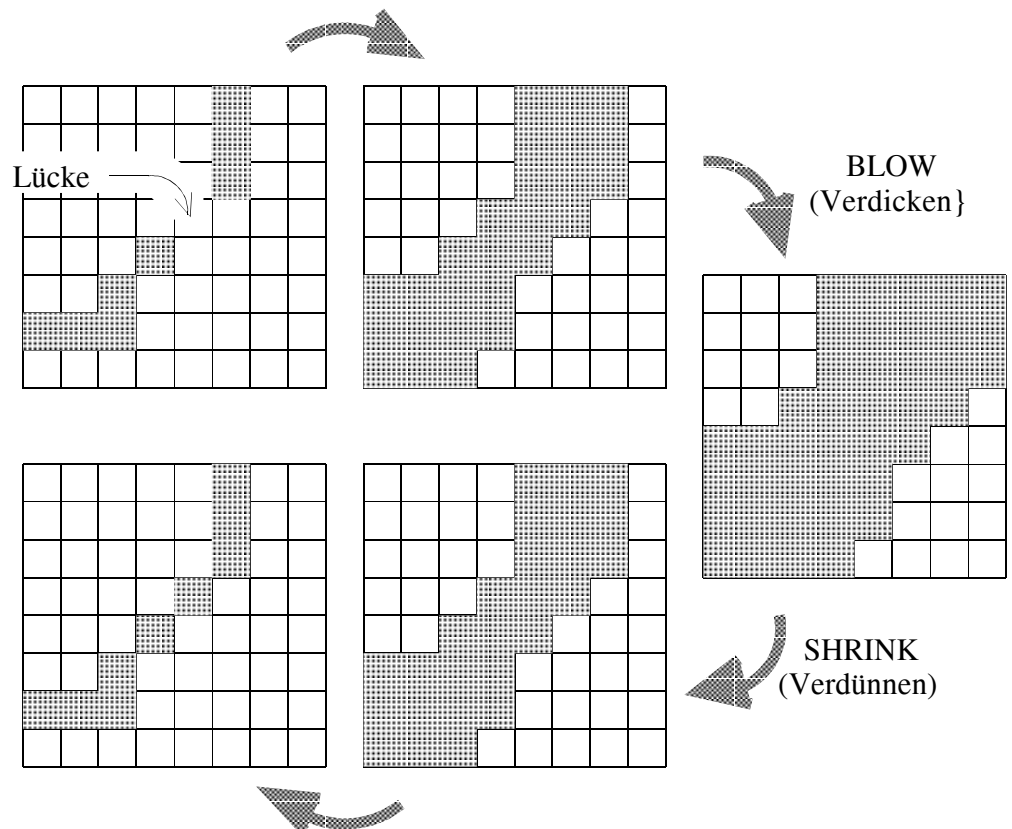


Abbildung 4.8: Füllen von Lücken durch Verdicken und Verdünnen

Eine Lückenfüllung kommt aber auch im Rahmen der *Generalisierung* in Betracht, wo wir beim Übergang zu einem anderen Maßstab kleine Störungen eliminieren wollen. Ein Maß für den Grad der Generalisierung ist sicher die Anzahl der Verdickungen bzw. Verdünnungen, die wir unserer Blow-shrink-Methode zugrunde legen. Verdicken wir das Muster extrem, so daß wir an den Bildrand stoßen, so haben wir auch eine extreme – wenn auch sinnlose – Generalisierung erreicht: Das gesamte Bild wird homogen. Neben der Lückenfüllung erzielen wir durch das sukzessive Verdicken und Verdünnen einen weiteren Ge-

neralisierungseffekt: Linien werden *geglättet*, denn kleine Ausrundungen verschwinden beim Verdicken, treten aber beim darauf folgenden Verdünnen nicht mehr auf. Wir merken hier an, daß wir die Reihenfolge der Operationen auch umkehren können: Wenn wir zuerst verdünnen, so verschwinden isolierte Grauwerte (*Störpixel*), die beim darauffolgenden Verdicken nicht mehr erscheinen. Die Operationen des Verdickens und Verdünnens *filtern* also das Bild. Wir beschäftigen uns weiter unten näher mit Filtermethoden.

Die Blow-shrink-Methode dient aber auch zur rastermäßigen Erzeugung kartographischer Symbole. So läßt sich etwa eine Autobahnsignatur folgendermaßen generieren: Man geht von einer Achse bzw. einem Skelett aus; diese Achse wird bis zur Innenbreite der zu erzeugenden Signatur verdickt. Außerdem verdickt man die Ausgangsachse auch bis zur Außenbreite. Nun folgt als arithmetische Operation eine Subtraktion der Außen- und Innenbreitebilder; schließlich wird dem Ergebnis noch die ursprüngliche Achse durch eine ODER-Operation überlagert [217].

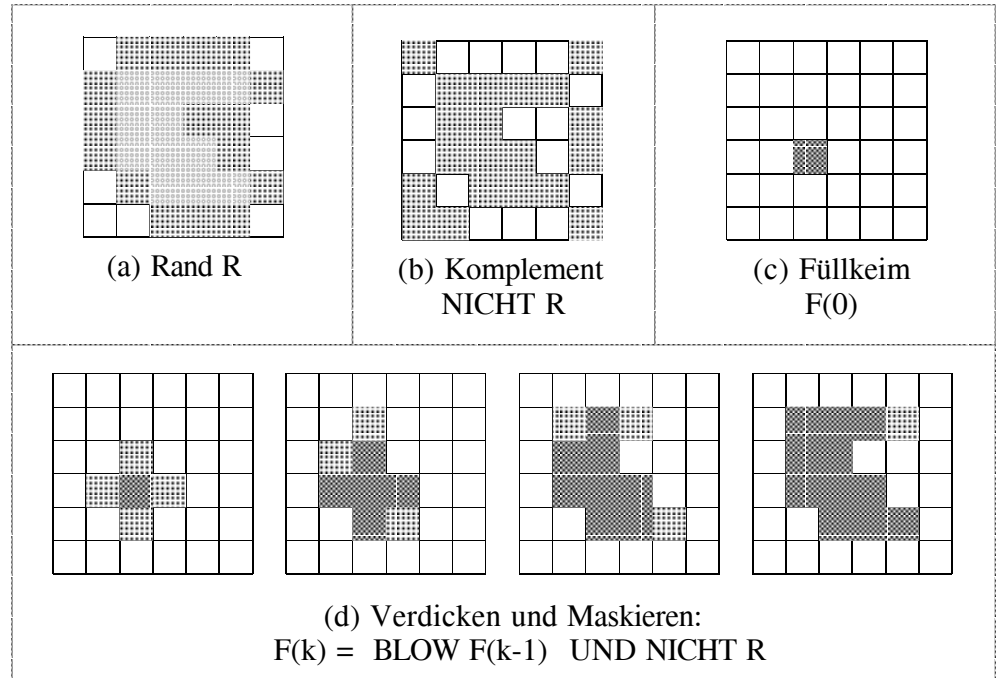


Abbildung 4.9: Flächenfüllung

Neben der Blow-shrink-Methode ist das *Füllen* einer vorgegebenen Fläche (*area flooding*) eine weitere wichtige Makro-Operation. In diesem Fall ist der Rand der Fläche vorgegeben. Man setzt nun in das Flächeninnere einen *Füllkeim* (*area seed*), den man sukzessive verdickt. Bei jedem Schritt verwendet man den vorgegebenen Rand als *Maske*, die verhindert, daß der verdickte Keim über diesen Rand hinauswächst. Das Maskieren geschieht etwa durch eine logische UND-NICHT-Verknüpfung des verdickten Keimes mit dem Rand (Abb. 4.9).

Wieder kann man hier verschiedene *Metriken* zugrunde legen. Wichtig ist vor allem, daß der Rand geschlossen ist, sonst ‘tritt die Füllfarbe aus’, und der Algorithmus versagt. Man muß daher gegebenenfalls den Rand durch eine Blowshrink-Operation vorbehandeln. Die Operation des Füllens ist sehr anschaulich, denn am Bildschirm werden Flächen auf diese einfache Weise mit Farben, Schraffuren etc. gefüllt. Das Löschen von Bildteilen kann man analog durch Füllen mit der Hintergrundfarbe bewerkstelligen. Für unsere Anwendungen ergeben sich jedoch viel allgemeinere Einsatzmöglichkeiten. So können wir zum Beispiel auf diese Weise flächigen Objekten eine Thematik zuordnen, wenn wir ihre Umrandung kennen; das bedeutet, daß wir die Thematik vom Rand einer Fläche in ihr Inneres fortsetzen können. Nebenbei bemerkt funktioniert der Algorithmus sogar dann, wenn in der Fläche Aussparungen auftreten. Auch die Frage, ob sich zwei Punkte innerhalb derselben vorgegebenen Umrandung befinden (Verallgemeinerung des Punkt-in-Polygon-Tests), läßt sich auf diese Weise lösen: So können wir versuchsweise in einem der beiden Punkte einen Füllkeim ansetzen und diesen verdicken. Wird der zweite Punkt letztendlich überdeckt, so befinden sich beide Punkte im selben Gebiet.

Schließlich wollen wir noch erwähnen, daß die Füllung einer vorgegebenen Fläche mit kartographischen *Flächensignaturen* (Moor, Wiese, Gewässer usw., siehe Abb. 3.14) auch auf diesem Algorithmus aufbaut: Die zu füllende Fläche wird vorläufig mit einer *Deckfarbe* gefüllt, die es erlaubt, die Rasterzellen des Bildes in zwei Klassen einzuteilen: in solche, die diese Deckfarbe aufweisen, und daher zur Fläche gehören, und in andere, die nicht in der Fläche enthalten sind. Der Prototyp des Flächensymbols (der *basic repeat*) liegt in Form eines Bitmusters vor. Dieser Prototyp wird nun durch Translation und logische ODER-Operationen auf ein genügend großes Gebiet vervielfältigt. Nun bildet man mittels UND den Durchschnitt des Symbolgebietes mit den Rasterzellen, welche die Deckfarbe enthalten, und erreicht dadurch auf höchst einfache Weise eine flächendeckende Füllung mit kartographischen Symbolen. Probleme, die durch Verstümmelungen am Rand auftreten, oder Flächen, die kleiner als der *basic repeat* sind, klammern wir hier aus.

Eine weitere wichtige Makro-Operation ist die Bildung der *Abstandstransformierten*. Man geht von einer Anhäufung von Rasterzellen gleichen Grauwertes aus. In unserem Fall kann es sich um Rasterzellen gleicher Thematik handeln, also etwa die Rasterzellen, die ein Waldgebiet überdecken. Für jede Rasterzelle kann man nun den kürzesten Abstand zum Rand (im Sinne der gewählten Metrik) ermitteln. Die Ergebnisse kann man in einem sekundären Rasterbild eintragen, eben in der Abstandstransformierten. Deren Grauwerte sind demnach als Abstände zu interpretieren. Tief im Inneren des Waldes werden also die Grauwerte der Abstandstransformierten hoch sein, während sie nach außen hin immer niedriger werden. Man spricht in diesem Fall auch vom ‘Abstandsgebirge’. Die Maxima dieses Abstandsgebirges bezeichnet man als *Skelett*.

Die Abstandstransformierte läßt sich sehr einfach durch unsere elementaren Operationen erzeugen: Wir stellen zuerst verdünnte Versionen unseres Zellhau-

fens her; wir magern diesen um eine, zwei, drei Zellenbreiten ab, so lange bis er verschwindet; sodann addieren wir alle diese Verdünnungen und erhalten so die Abstandstransformierte (Abb. 4.10).

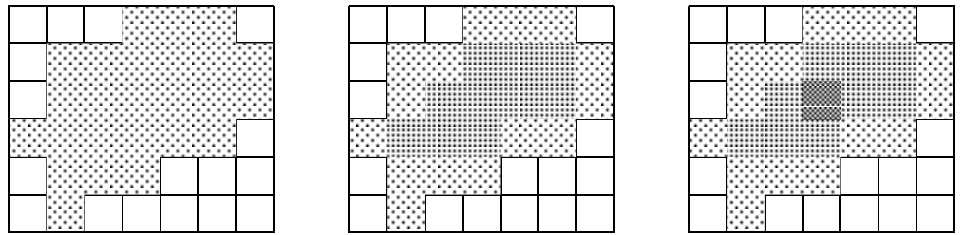


Abbildung 4.10: Bildung der Abstandstransformierten

4.2.3 Filtermethoden

Filtermethoden bilden ein eigenes Kapitel innerhalb der Makro-Operationen. Der Ausdruck kommt – wie viele andere in der Bildverarbeitung gebräuchliche Ausdrücke – aus der Nachrichtentechnik; dort versteht man darunter die Unterdrückung bestimmter Frequenzbereiche einer durch periodische Schwingungen gekennzeichneten Erscheinung. Der zugrundeliegende Prozeß ist eine Funktion der Zeit. In unseren Anwendungen handelt es sich um Änderungen der Grauwerte als Funktion *des Ortes*. Ändern sich die Grauwerte von Ort zu Ort nur geringfügig (wie zum Beispiel im Inneren einer homogenen Fläche), so interpretieren wir dies als niedrigfrequente Schwingung. Am Rand einer solchen Fläche ändern sich die Grauwerte abrupt; wir haben es dort mit einer hochfrequenten Schwingung zu tun. Wir können nun – je nach dem gewünschten Resultat – die hochfrequenten Änderungen unterdrücken und damit die niedrigen Frequenzen stärker betonen: Dies ist eine *Tiefpaßfilterung*; sie macht die Ränder unscharf, mildert den gezahnten Treppeneffekt, unterdrückt kleine Lücken und Ausreißer. Unterdrücken wir aber die niedrigfrequenten Anteile und lassen nur die hochfrequenten Anteile zu, so ist dies eine *Hochpaßfilterung*. Sie hebt Ränder und Konturen stärker hervor. Für beide Varianten finden wir Anwendungen im Rahmen der digitalen Kartographie, aber auch der Geoinformatik.

So können wir aus Fernerkundungsdaten Vegetationsklassen extrahieren. Angenommen, wir erlauben zwei Klassen LAUBWALD und NADELWALD. Die beiden Klassen sind durch zwei verschiedene Grauwerte gekennzeichnet. (Dies ist natürlich ein Falschfarbenbild; es entspricht also nicht dem Eindruck, den unser Auge beim Überfliegen des Geländes erhielte.) Es wird gewiß größere zusammenhängende Flecken geben, die reines Nadelwaldgebiet sind (Mittelgebirgslagen). In tieferen Lagen gibt es dafür große Laubwaldflächen. Wollen wir daraus wirklich *Flächen* im Sinne des Vektormodells machen, also Objekte mit einem linienförmigen Rand und etwaigen Aussparungen, so ist eine Hochpaßfilterung ein wichtiger Schritt in diese Richtung. Wollen wir andererseits das

Konzept des MISCHWALDES einführen, weil ansonsten die Ränder zwischen den NADELWALD- und LAUBWALD-Zonen gar zu abenteuerliche Formen annehmen, so hilft uns die Tiefpaßfilterung.

Wie können wir eine solche Filterung erreichen? Eine Möglichkeit ist die *Konvolution*. Dabei wird jeder Grauwert durch ein gewogenes Mittel seiner Umgebung ersetzt. Wir können dies als eine Folge von Elementaroperationen ansehen. Wir verschieben das Urbild etwa nach oben, rechts, unten und links und addieren dann das Urbild und alle Translationen. Wir sehen, daß diese Operation ähnlich wie eine BLOW-Operation abläuft, nur daß wir die Bilder hier addieren, während wir sie dort einer logischen ODER-Verknüpfung unterzogen haben. Da wir jedoch in unseren Anwendungen den Grauwert nicht unbedingt nur wörtlich als solchen verstehen, sondern durch ihn eine Thematik ausdrücken, kann der Summe von Grauwerten nicht immer eine sinnvolle Deutung gegeben werden; es sei denn, wir führen – wie oben angedeutet – neue thematische Klassen ein. Ansonsten müssen wir eine Schwellwertoperation anwenden, um die Resultate der Filterung in die zugrundeliegende Thematik abbilden zu können (Abb. 4.11). Dieser Konvolution liegt die folgende Formel zugrunde, in welcher $G(x, y)$ der Grauwert an der Stelle (x, y) ist, während $G'(x, y)$ den gefilterten Grauwert angibt und w_{ij} die Elemente einer Gewichtsmatrix W sind.

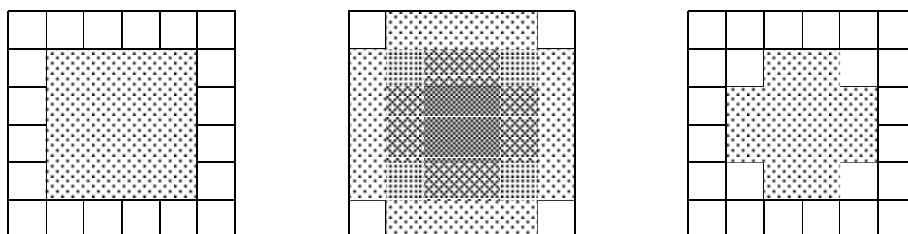


Abbildung 4.11: Tiefpaßfilterung, gefolgt von Schwellwertbildung

$$\begin{aligned}
 G'(x, y) &= w_{22} \cdot G(x, y) \\
 &+ w_{21} \cdot G(x-1, y) + w_{23} \cdot G(x+1, y) \\
 &+ w_{12} \cdot G(x, y-1) + w_{32} \cdot G(x, y+1)
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

Die Gewichtsmatrix lautet in unserem Fall:

$$W_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \tag{4.3}$$

In dieser Formel gehen wir von einem Ursprung aus, der links oben liegt; die x-Werte werden also von links nach rechts gezählt, die y-Werte von oben nach unten. Die Formel muß am Bildrand entsprechend modifiziert werden. Natürlich

kann diese Gewichtsmatrix im allgemeinen größer als 3×3 sein. Je größer sie ist, desto stärker ist die Filterung. Nimmt man sie im Extrem so groß wie das gesamte Bild an, so wird ein einheitlicher Grauwert für dieses Bild erzeugt. Außerdem können neben Nullen und Einsen auch andere Zahlen auftreten. Interessant ist zum Beispiel folgende Gewichtsmatrix:

$$W_2 = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

Sie entspricht einer Multiplikation der Grauwerte des Urbildes mit 4 und einer nachfolgenden Subtraktion der nach den vier Himmelsrichtungen verschobenen Bilder. Das Ergebnis ist eine *Hochpaßfilterung*. Das Innere eines homogenen Zellhaufens weist nach der Filterung Nullwerte auf, während der Rand hervorgehoben wird. Offenbar sind die negativen Vorzeichen in der Matrix W_2 verantwortlich für die Unterdrückung der niedrigfrequenten Schwingungen. Die zunächst auftretenden negativen Grauwerte am äußersten Rand können wir durch eine logische UND-Verknüpfung mit dem Urbild unterdrücken (Abb. 4.12).

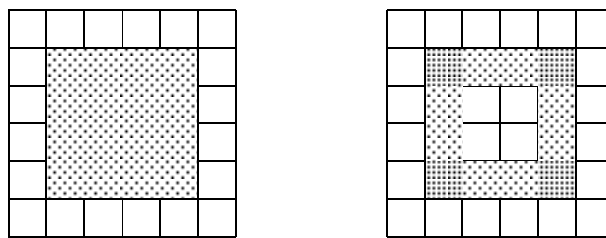


Abbildung 4.12: Hochpaßfilterung; negative Grauwerte werden unterdrückt

In der Mathematik bezeichnet man solche Differenzenbildungen als *Gradienten*. In der Tat entspricht die Matrix W_2 dem *Laplace-Gradienten*. Es gibt eine ganze Reihe anderer Vorschläge mit Gradienten, die für die Extraktion von Rändern geeignet sind. So könnten wir uns beispielsweise auf Differenzen in x-Richtung beschränken; für kartographische Schriften würden sich in diesem Fall schöne Schatteneffekte ergeben.

Gradienten können auch zur Ermittlung der Steilheit des Geländes in einem DGM eingesetzt werden. Das entstehende *Neigungsmodell* enthält pro Zelle die maximale Steigung bzw. das maximale Gefälle; es kann formal wieder wie ein DGM behandelt werden. In vergleichbaren Modellen mit Rasterdaten anderer thematischer Herkunft sind sinngemäße Verwendungen denkbar: So kann man in einer statistischen Analyse des Pro-Kopf-Einkommens nicht nur ein 'Einkommensgebirge' (formal also ein DGM) errichten, sondern auch jene Gegenden ermitteln, wo das stärkste Einkommensgefälle beobachtet wird.

Die Filtermethode der Konvolution ist ein einfaches und doch mächtiges Werkzeug, das in vielfältiger Weise eingesetzt werden kann. Das nächstliegende Einsatzgebiet ist die Bildverbesserung. Wenn etwa die Rastereinteilung zu grob ist, so kann man durch eine Tiefpaßfilterung eine Milderung des Treppeneffektes erreichen. Ein weiteres wichtiges Einsatzgebiet der Filterung ist die *Generalisierung* von Flächen im Rasterformat. Die Tiefpaßfilterung schließt kleine Lücken zwischen homogenen Zellhaufen und füllt Einbuchtungen auf. Bei der Generalisierung von Gebäuden wachsen einzelne Häuser zu Ortskernen zusammen; *Aussparungen* – also Waldlichtungen und dergleichen – werden zum Verschwinden gebracht; all dies wird unter der Bezeichnung *Zusammenfassung* als Teilaspekt der Generalisierung betrachtet. Durch das Auffüllen der Einbuchtungen werden die Umrandungen von Rasterflächen *vereinfacht*. Außerdem *eliminiert* die Tiefpaßfilterung kleine isolierte Flecken, deren Ausdehnung das Maß der Filterung nicht übersteigt; einzeln stehende Häuser oder kleine Baumgruppen scheinen in der generalisierten Karte nicht mehr auf. Dies wird als *Auswahl* bezeichnet.

Eine solche Generalisierung über ein automatisierbares Filterverfahren kann in Einzelfällen zu unerwünschten Ergebnissen führen. So müssen prägnante Merkmale einer Karte – wie etwa Steilhänge oder Bruchkanten – auch in der generalisierten Karte als solche erkennbar sein. Außerdem müssen Bauwerke, die der Orientierung in der Karte dienen (Kapellen, Bildstöcke, Schutzhütten), vor einer Elimination geschützt werden; das heißt, daß wir in einem solchen Fall bewußt eine Maßstabsverfälschung in Kauf nehmen, um den *Informationsgehalt* der Karte zu erhalten. Wir können hier mit einer Hochpaßfilterung gegensteuern, denn diese hebt ja gerade Details und Ränder (also die hochfrequenten Anteile des Bildes) hervor. Probleme dieser Art rühren vornehmlich daher, daß Rasteroperationen pauschal arbeiten, mit wenig Sinn für das Detail; das muß so sein, denn wir können nicht erwarten, daß eine global einfache – und daher automatisierbare – Methode auch lokal stets alle Hindernisse mit Bravour meistert.

Oft wird neben der Zusammenfassung, der Vereinfachung und der Auswahl die *Verdrängung* als Generalisierungsaspekt genannt. Topologische Bedingungen werden – wenn es nicht anders geht – der Geometrie vorgezogen. In einem engen Gebirgstal, das einen Fluß, eine Straße, eine Eisenbahnlinie und womöglich noch eine Autobahn aufnimmt, müssen nicht nur diese linienhaften Strukturen, sondern auch allenfalls benachbarte Signaturen von ihrer geometrisch richtigen Position verdrängt werden, um den Informationsgehalt der Karte sicherzustellen. Im Rahmen der automatisierbaren Rasteroperationen bietet sich hier der Einsatz der oben besprochenen *Abstandstransformierten* an. Sie spiegelt die Abstände der Rasterzellen verschiedener Themen (also zum Beispiel zwischen Straße und Eisenbahn) wider. Dort, wo diese Abstände eine bestimmte minimale Schranke unterschreiten, muß verdrängt werden. Auf die entsprechende Problematik wollen wir hier nicht näher eingehen. Es sei auf eine detaillierte Abhandlung in [126] verwiesen.

Zur Filterung eines Grauwertbildes kann neben der Konvolution auch die diskrete *Fourier-Transformation* verwendet werden. Ihr liegt die Idee zugrunde, daß man die Ausgangsdaten einer durch periodische Schwankungen gegebenen Erscheinung – bei uns sind es die Grauwerte des Bildes – zunächst in einen *Frequenzbereich* transformiert, weil die Anwendung einer bestimmten Operation – etwa einer Filterung – dort einfacher ist. So vereinfachen sich beispielsweise Faltungsintegrale im Ortsbereich zu Multiplikationen im Frequenzbereich. Andererseits verursacht die Transformation in den Frequenzbereich einen gewissen Aufwand, und natürlich müssen wir das Ergebnis einer Filterung mittels der inversen Transformation wieder in den ursprünglichen Raum, den *Ortsbereich*, zurückbringen. Wir transformieren also zunächst jeden Grauwert $G(x, y)$ des Urbildes in den *Frequenzbereich*:

$$S(a, b) = \frac{1}{N^2} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} G(x, y) e^{\frac{-2i\pi}{N}(ax + by)} \quad (4.5)$$

N ist die Dimension des Urbildes; bei der Berechnung eines transformierten Grauwertes werden also sämtliche Grauwerte des Urbildes benötigt. Anschließend wird der transformierte Grauwert im Frequenzbereich einer Filterung unterzogen:

$$S'(a, b) = H(a, b) \cdot S(a, b) \quad (4.6)$$

Zuletzt kehren wir wieder in den *Ortsbereich* zurück:

$$G'(x, y) = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} S'(a, b) e^{\frac{2i\pi}{N}(ax + by)} \quad (4.7)$$

Wir haben hier nur die einfachste Form der Fourier-Transformation dargestellt. Sie ist relativ rechenaufwendig, da man immer gleichzeitig die Information des gesamten Urbildes benötigt. Es gibt verschiedene Varianten, die effizienter arbeiten, wie zum Beispiel die *Fast-Fourier-Transformation (FFT)*.

4.3 Algebra für Rasterdaten

Beim Aufarbeiten der in diesem Kapitel aufgezeigten Möglichkeiten kristallisiert sich ein weiterer Diskussionspunkt heraus: Für viele Situationen gibt es mehrere äquivalente Möglichkeiten der Lösung. Es wäre schön, ein *minimales* und gleichzeitig auch *ausreichendes* Instrumentarium an Rasteroperationen zur Verfügung zu haben, das konsistent in seiner Handhabung ist. Ein entsprechendes Gedankengebäude wird als *Algebra* bezeichnet, in Anlehnung an die Algebra der Zahlen. Dort werden Elemente (Zahlen) durch eine Reihe von Operationen bzw. Verknüpfungen (Addition, Subtraktion etc.) in andere Elemente

übergeführt, wobei alle diese Operationen ein konsistentes Gedankengebäude ergeben. Mit der *Map Algebra* hat Tomlin [205] einen ähnlichen Zugang für Rasterdaten vorgeschlagen. Als Elemente treten Matrizen mit Zahlenwerten auf, also z.B. Rasterbilder. Sie dürfen bestimmten Operatoren (Verknüpfungen) unterworfen werden. Das Ergebnis einer solchen Operation ist wieder eine Matrix bzw. ein Bild. Beispiele für solche Operatoren sind

- die Multiplikation eines Bildes mit einem Skalar,
- die Addition zweier Bilder,
- die Distanzmatrix bezüglich einer gegebenen Grauwertanhäufung,
- der Gradient (Hochpaßfilterung).

Bestechend daran ist, daß die Liste von Operatoren beschränkt ist. Tomlin spricht von 64 Operatoren, die genügen, um alle denkbaren Wünsche bezüglich Rasteroperationen erfüllen zu können. Die Operatoren sind nur auf Rasterdaten anwendbar. Vektordaten müssen daher gegebenenfalls in einem vorbereitenden Schritt gerastert werden. Der ‘Grauwert’ einer Rasterzelle entspricht der Semantik (einem Attributwert) dieser Zelle. Je nach der Art der Semantik bzw. der Sinnhaftigkeit von darauf aufbauenden Operatoren sind Attribute in folgender Weise charakterisierbar:

- *Ratio*: Absolute Werte auf einer linearen Skala. Sie erlauben das Ausrechnen von Proportionalitäten. Beispiele für solche Attributwerte sind Entfernungs-, Kosten- und Altersangaben: Das doppelte Alter, die Kosten pro Entfernung usw. lassen sich durchaus sinnvoll ermitteln.
- *Intervall*: Relative Werte auf einer linearen Skala. Additionen und Subtraktionen sind sinnvoll, Multiplikationen und Divisionen nicht. Typisch für solche Attribute ist das Auftreten negativer Werte. Beispiele sind Höhen, Temperatur und Datumsangaben: Die Addition von Höhen, das Mitteln von Temperaturen ist sinnvoll, das ‘halbe Datum’ hingegen nicht.
- *Ordinal*: Geordnete Werte. Typisch sind GRÖßER-ALS-Abfragen. Beispiele sind ein Erosionsgefährdungswert (gering / mittel / hoch) oder Prioritäten im Rahmen einer Umweltverträglichkeitsprüfung. Die Mittelung zweier Gefährdungs- oder Umweltverträglichkeitsgrade ist sinnlos.
- *Nominal*: Sonstige Werte, für die nur mehr GLEICH-Abfragen sinnvoll sind. Beispiele sind Vegetationsarten (Laubwald / Nadelwald / Mischwald) oder Straßentypen (Hauptstraße / Nebenstraße).

Alle Operatoren (Funktionen) werden in folgender Form verwendet:

NEWLAYER = FUNCTION OF FIRSTLAYER
 [AND SECONDLAYER]
 [AND NEXTLAYER] etc.

unter Zusatz diverser weiterer *Modifikatoren* wie etwa AT, BY, SPREADING IN, RADIATING ON etc. Für Operatoren gibt es vier typische Klassen, die sich aus deren Einzugsbereich ergeben (siehe Abb. 4.13):

- *Lokale Operatoren*: Genau ein Pixel – unter Umständen in mehreren Layers an derselben Stelle – wird betrachtet.
- *Fokale Operatoren*: Wir betrachten eine feste Umgebung, etwa den Wert gemeinsam mit seinem westlichen, östlichen, nördlichen und südlichen Nachbarn.
- *Inkrementelle Operatoren*: Man geht entlang von vorgegebenen ein-, zwei- oder dreidimensionalen GI-Objekten vor, wie etwa längs einer Kette von Pixels, oder über ein Gelände hinweg.
- *Zonale Operatoren*: Innerhalb eines vorher festgelegten Gebietes (einer Zone) eines Layers A werden Werte aus Pixels eines Layers B berechnet, so etwa in dem man alle Werte von B-Pixels addiert, die innerhalb einer solchen A-Zone liegen.

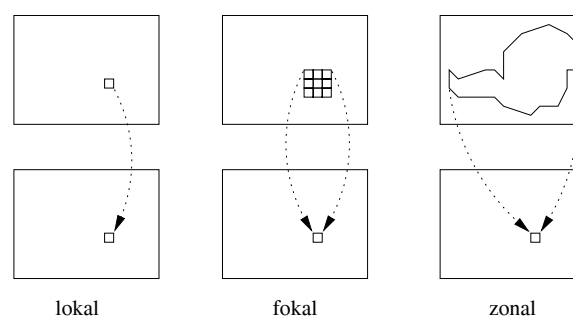


Abbildung 4.13: Lokale, fokale und zonale Operatoren der Rasteralgebra

Zur Erklärung seien die folgenden Beispiele angefügt:

AVERAGEBEST = LOCALMEAN
 OF YOURBEST AND MYBEST
 AND HERBEST AND HISBEST
 SMOOTHALTITUDE = FOCALMEAN OF ALTITUDE AT 100
 UPSTREAM = INCREMENTALDRAINAGE OF ALTITUDE
 HOMESPERBLOCK = ZONALSUM OF HOUSING WITHIN BLOCKS

AVERAGEBEST vergleicht vier verschiedene Layers und bildet jeweils das arithmetische Mittel. So kann man etwa mehrere Varianten für die Lösung eines

Standortproblems miteinander in Bezug bringen. Angenommen, es existieren vier Varianten für die optimale Platzierung neuer Wohnsiedlungen, weil vier Experten aus unterschiedlichen Fachdomänen ihre Präferenzen für den Standort jeweils anders setzen. Somit kann man mittels AVERAGEBEST die mittlere Eignung eines Standortes errechnen. Eine ähnliche Funktion LOCALVARIETY ergibt etwa die Werte 0 für ‘nie gewählt’ bis 4 für ‘viermal gewählt’. Die höchstdotierten Stellen im Ergebnis-Layer können dann mit Fug und Recht als optimale Standorte bezeichnet werden.

Während dieser Vergleich über lokale Operatoren pixelweise ausfällt, ist der Operator SMOOTHALTITUDE fokal, der eine Tiefpaßfilterung durchführt und damit etwa eine Glättung von Geländehöhen bewirkt: Dabei werden alle Höhen im Umkreis von 100 m für eine Mittelbildung herangezogen. Ein anderer fokaler Operator FOCALGRAVITATION erzeugt Werte des Ergebnis-Layers, indem eine gewichtete Mittelung einzelner isolierter Werte eines Ausgangs-Layers vorgenommen wird. Das Gewicht i ergibt sich als Reziprokwert der quadratischen Distanz der betrachteten Zelle vom Punkt i . Somit entspricht dies der Interpolation durch ein *Gleitendes Mittel* (siehe Kapitel 5). Eine Anwendung stellt die Berechnung der Höhe eines Neupunktes aufgrund vorgegebener Höhen in seiner Nachbarschaft dar; je näher diese ‘Alt’-Punkte liegen, desto stärker ist ihr Einfluß auf die Höhe des Neupunktes.

Von den inkrementellen Operatoren beantwortet UPSTREAM die Frage, in welche Richtung das Wasser im jeweiligen Punkt abfließen würde, und schließlich ist noch die Erklärung von HOMESPERBLOCK ausständig. Diese Operation setzt voraus, daß es einen Layer HOUSING gibt, in dem jede Vordergrundzelle ein Haus darstellt, sowie einen Layer BLOCKS, der durch Segmentierung dieses Layers entstanden ist. Jeder Block entspricht dann in der realen Welt einem Häuserblock und im Datenbestand einem Pixelhaufen. Dann wird pro Block die Anzahl der Häuser festgestellt, und alle Pixels des HOMESPERBLOCK, die mit dem Block deckungsgleich sind, werden herangezogen.

Geoinformatik

Modelle, Strukturen, Funktionen

Bartelme, N.

2005, X, 454 S. 146 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-540-20254-7