

# Segmentierung und Klassifikation orthogonaler Straßennetze mittels Richtungscodierung — Technischer Bericht —

Annett Faber  
Institut für Photogrammetrie  
Universität Bonn  
Nußallee 15, 53115 Bonn

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>2</b>
1.1	Motivation . . . . .	2
1.2	Ziel der Studie . . . . .	4
1.3	Konzept . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Modellierung</b>	<b>6</b>
2.1	Objektmodell . . . . .	7
2.2	Sensormodell . . . . .	8
2.3	Bildmodell . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Verfahren</b>	<b>9</b>
3.1	Vorverarbeitung und Repräsentation . . . . .	9
3.1.1	Vergrößerung . . . . .	9
3.1.2	Linienextraktion . . . . .	9
3.1.3	Orientierungsbestimmung . . . . .	10
3.1.4	Linienkodierung und Repräsentation der Kanten . . . . .	10
3.2	Segmentierung . . . . .	12
3.2.1	Modalwertbestimmung . . . . .	12
3.2.2	Partitionierung . . . . .	13
3.3	Klassifikation . . . . .	14
<b>4</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>15</b>
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>18</b>

# 1 Einleitung

Die Struktur einer Stadt, wie sie sich vom Satelliten oder von hochfliegenden Flugzeugen aus darstellt, wird hauptsächlich durch drei grundlegende Elemente geprägt:

- a) das Straßennetz,
- b) die Morphologie der Baulichen Nutzung und
- c) die Verteilung der Vegetation.

Das Straßennetz fällt in Satellitenbildern wegen der besonderen geometrischen Anordnung als künstliches Objekt unmittelbar auf und läßt sich – zumindest partiell – mit nicht zu komplexen Bildverarbeitungsverfahren erfassen.

Die bauliche Nutzung, vor allem Wohnhäuser und Industrieanlagen, füllt die zwischen den Straßen aufgespannten Baublöcke, im Inneren von Städten fast vollständig am Rand partiell. In kleinmaßstäbigen Bildern sind die Gebäude schwierig zu erkennen und fast nicht zu rekonstruieren.

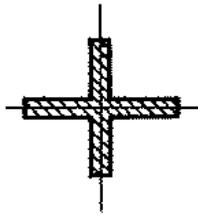
Die Komplementarität von Straßennetz und baulicher Nutzung ist deutlich aus den in Abb. 1 auf der nächsten Seite dargestellten Grundformen der Siedlungsstruktur zu erkennen ist [[1]].

Beide Elemente werden zusätzlich durch die Vegetation überlagert. Breite Straßen sind oft durch Alleen begrenzt, Plätze enthalten häufig kreis- oder rechteckig angeordnete Baumgruppen. Dagegen ist die Vegetation in Vorstädten außerordentlich vielfältig und unregelmäßig angeordnet. Liegen Farb- oder Multi-spektralaufnahmen vor, kann die Vegetation vergleichsweise leicht von den beiden anderen Elementen getrennt werden.

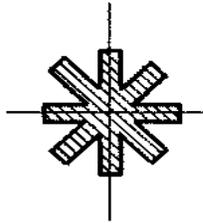
## 1.1 Motivation

Wir sind an der Extraktion der Siedlungsstruktur aus Bildern der MOMS02-Kamera interessiert, um die kleinmaßstäbige Kartierung zu unterstützen und – bei Vorliegen von Aufnahmen unterschiedlicher Zeitpunkte – Änderungen zu identifizieren, die dann ggf. Grundlage für die Planung von Luftbild- oder Laserbefliegungen sein können. Konkretes Ziel ist eine *linienartige* Erfassung des Straßennetzes und eine *flächenhafte* Erfassung der Siedlungs- und Vegetationsgebiete.

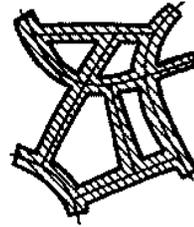
Nachfolgend werden die Gründe aufgeführt, warum wir zur Erlangung des Ziels mit der Rekonstruktion der Straßennetze begonnen haben. Straßennetze sind von den drei genannten topographischen Elementen von Siedlungen die lang-lebigsten. Das Erschließungssystem von Straßen und Wegen, die zum Straßennetz gehören, stellt das räumliche Organisationsgerüst einer Siedlung dar. Das Straßennetz stellt das Verbindungssystem dar, an das das gesamte Nutzungsgefüge



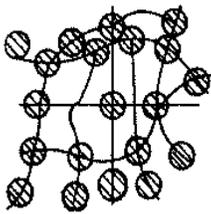
Linie Kreuz



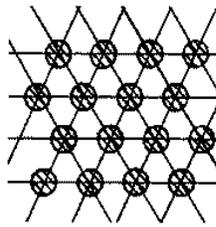
Linie Stern



Linie Netz



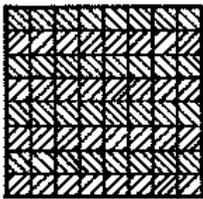
Punkt disloziert



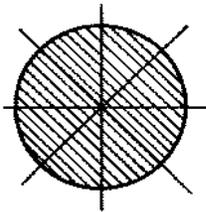
Punkt galaxial



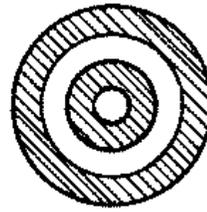
Punkt  
Streusiedlung



Fläche Raster



Fläche Kreis



Fläche Ring

Abbildung 1: Grundformen der Siedlungsstruktur

einer Siedlung angeschlossen ist. Es ist also keine Nutzung ohne Anschluß möglich [[1]].

Wie erste Untersuchungen ergeben haben, ist das Straßennetz gleichzeitig am leichtesten zu erfassen und für die Rekonstruktion der Gesamtstruktur am wichtigsten, da sich Bebauung und Vegetation bei Vorliegen einer Hypothese über das Straßennetz einfacher klassifizieren lassen und helfen können, die bei der Rekonstruktion des Straßennetzes offen gebliebenen Lücken zu schließen.

Netze werden nach [1] aus parallelen linearen Strängen aufgebaut, die quer zu

einer Hauptrichtung mit gleichen oder ähnlichen Strängen parallel verbunden werden. Dabei kommt es topologisch nicht auf die Form sondern auf die Eigenschaften der Verknüpfungen an. Es ist unerheblich, ob die Stränge parallel, gerade oder gekrümmt sind. Sehr dichte Anordnungen von Strängen bilden stabile Netze, die kaum noch kompakter zu gestalten sind, lockerere Anordnungen bilden größere Zwischenräume, die Platz für zusätzliche Unterteilungen lassen.

In Tabelle 1 sind die wesentlichen Typen von Straßennetzen aufgeführt und einige beispielhaft in der Abb. 2 auf der nächsten Seite dargestellt.

vollständige Netze	unvollständige
rechteckige schiefwinklige rechteckige mit Diagonalen unregelmäßige	(keine weitere Unterteilung)

Tabelle 1: Typen von Straßennetzen

In der Realität treten unvollständige Netze erwartungsgemäß wesentlich häufiger auf als die vollständigen. Sie entstehen aus Verbindungen zwischen bereits im Raum vorhandenen Nutzungen und dringen nur soweit in diesen Raum vor, wie es die entsprechenden Nutzungen erfordern. Beispielsweise begrenzen alleinstehende Höfe oder Industrieanlagen die weitere Ausdehnung der Siedlung in einer Form, die i. a. bei geordneter Planung später noch in der Siedlungsstruktur erkennbar ist.

## 1.2 Ziel der Studie

In der vorliegenden Studie wollen wir Siedlungsstrukturen mit dominant orthogonalen Netzen analysieren und rekonstruieren. Ziel der Rekonstruktion ist die Partitionierung des Siedlungsgebiets in zusammenhängende Bereiche mit *gleicher* Ausrichtung des Straßennetzes und die Identifikation von i. a. überörtlichen Straßen, die nicht zum lokalen Netzmuster passen.

Die Motivation dafür liegt darin, daß dieser Netztyp der am häufigsten in geplanten Städten vorkommende ist. Diese große und bereits historische Bedeutung

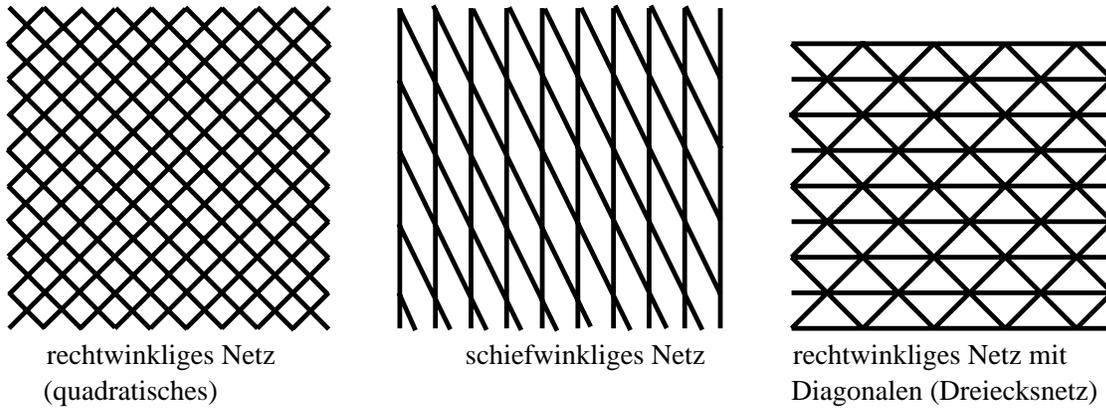


Abbildung 2: Beispiele vollständiger Straßennetze

verdankt dieser Netztyp seiner Eigenschaft, Flächen sehr rationell aufzuteilen. Die so entstandenen Teilflächen lassen sich problemlos „addieren, zusammenlegen oder wiederum aufteilen, ohne das Restflächen entstehen“[[1], S. 45]. Hyppodamos bezeichnete das Gitternetz als die „Rationalität zivilisierten Verhaltens“[[5], S. 70].

Städte, die durch eine solche Orthogonalität geprägt sind, sind z.B. San Francisco, Canberra, Barcelona und New York. Abbildung 3 zeigt mögliche orthogonale Netzstrukturen, Abbildung 11 auf Seite 16 ein MOMS02-Bild von Harare.

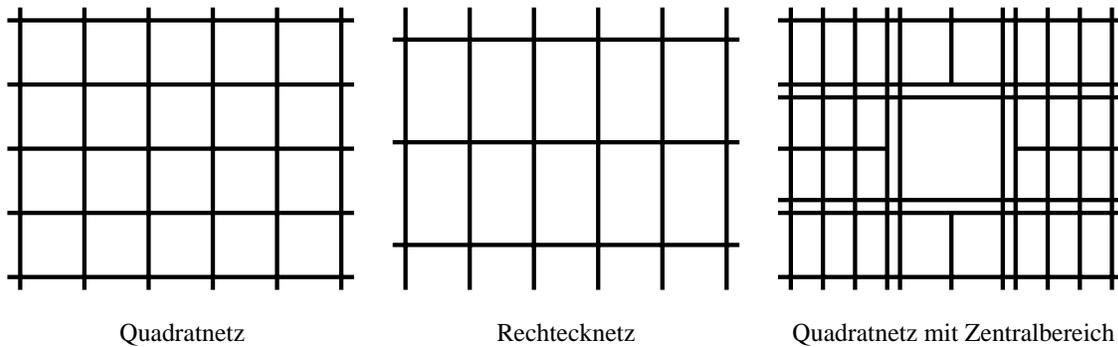


Abbildung 3: Beispiele orthogonaler Straßennetze

### 1.3 Konzept

Allgemein läßt sich unsere Aufgabe als Regelsystem[[3]] , genauer als eine Art Mitkopplung, darstellen, die gemäß Abb. 4 auf der nächsten Seite aufgebaut ist.

Die zu verändernden Eingangsgrößen sind die Bilddaten, die erwarteten Ausgangsgröße die digitale Karte. Die Steuergrößen, die unmittelbar auf die Regel-

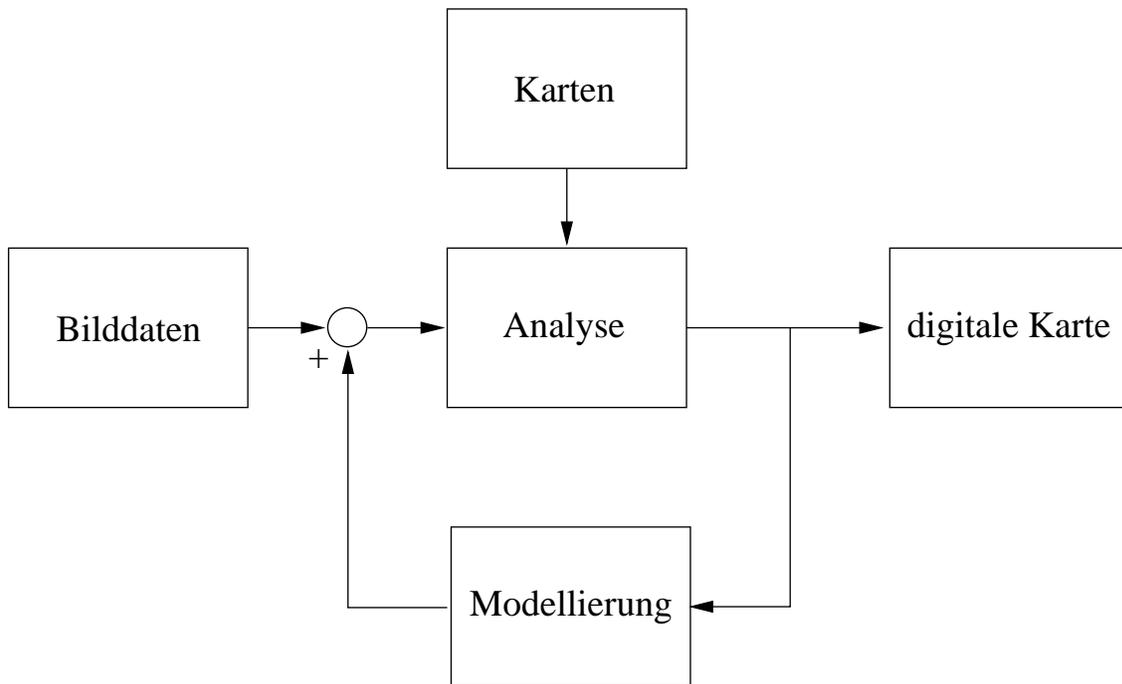


Abbildung 4: Gesamtkonzept

strecke einwirken können, sind die eventuell bereits vorhandenen Karten über die zu erfassenden Gebiete.

Die Regelstrecke selbst ist durch zwei Operatoren gegeben:

- a) das Analyseverfahren und
- b) die Modellierung der generischen Struktur des erwarteten Straßennetzes

Dabei wird das Modell zur Steuerung des Analyseprozesses verwendet. Hingegen werden die Ergebnisse der Analyse eingesetzt, das angenommene Modell zu verbessern und somit die Leistungsfähigkeit der einzelnen Analyseschritte zu erhöhen.

Im Fall unserer Studie ist das Analyseverfahren das in Abschnitt 3 auf Seite 9 beschriebene Verfahren zur Rekonstruktion dominant orthogonaler Straßennetze mittels richtungscodierter Liniensegmente.

## 2 Modellierung

Das verwendete Modell besteht aus drei Teilen:

- a) dem Objektmodell

- b) dem Sensormodell und
- c) dem Bildmodell

Sie werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

## 2.1 Objektmodell

Straßen und Wege werden als die in Abschnitt 1.1 auf Seite 2 genannten Stränge eines Netzes modelliert. Sie werden immer als linienhafte Gebilde angesehen, was den Anforderungen an die Zielstellung (Gewinnung digitaler Karten) gerecht wird.

Unter orthogonalen Straßennetzen werden solche Netze verstanden, deren Straßen orthogonal zueinander angeordnet sind. Dominant bedeutet, daß in einer lokalen Umgebung eine ausgezeichnete Orientierung der Straßen vorherrscht.

Die *ideale Karte*  $\mathcal{K}$  besteht aus einer die Fläche füllenden Partitionierung

$$\begin{aligned} \mathcal{K} &= \bigcup_{i=1}^n \mathcal{K}_i \\ \mathcal{K}_i \cap \mathcal{K}_j &= \emptyset \quad \forall i, j \end{aligned}$$

Jedem Gebiet  $\mathcal{K}_i$  ist eine Orientierung  $\phi_i$  zugeordnet. Sie ist der kleinste Richtungswinkel, den eine Straße aufweist, die zum orthogonalen Netz gehört. Der Richtungswinkel liegt daher im Intervall  $[0, \pi/2)$ .

In jedem Gebiet liegen Straßen  $s_{ij}$ , die zwei Klassen zugeordnet sind:

1. Straßen, die zum orthogonalen Netz gehören. Sie sind gerade. Ihr Typ ist  $\mathfrak{t}(s_{ij}) = \mathfrak{o}$ . Ihr Richtungswinkel ist

$$\phi_{ij} = \phi_i + k \frac{\pi}{2} \quad k \in \{0, 1, 2, 3\} \quad (1)$$

mit zufälligem  $k$ .

2. Straßen, die nicht zum orthogonalen Netz gehören. Ihr Typ ist  $\mathfrak{t}(s_{ij}) = \mathfrak{n}$ . Ihr Richtungswinkel ist zufällig. Wir nehmen Gleichverteilung auf dem Einheitskreis an:

$$\phi_{ij} \sim U(0, 2\pi) \quad (2)$$

Das Straßennetz wird als zusammenhängend angenommen, stellt also einen planaren zusammenhängenden Graphen dar. Diese Annahme wird jedoch für die Segmentierung und Klassifizierung – zunächst – nicht verwendet. Die Verbindungslinien der Knoten sind gerade.

Die *reale Karte* beschreibt die derzeitige aus Satellitendaten extrahierbare Linienstruktur. Sie stützt sich auf das Programm zur Linienextraktion von C. Steger [[6]]

Die reale Karte entsteht aus der idealen Karte durch:

1. Elimination der Knoten, da bisher keine Knotenbildung nach der Linienextraktion erfolgt.
2. Zufälliges Weglassen einzelner Straßenstücke, da nicht alle Straßenstücke erkennbar oder extrahierbar sind, und
3. Zufällige geometrische Störung der verbleibenden Straßenstücke, die sich durch das Bildrauschen und das Extraktionsverfahren ergibt.

Daher steht eine Liste von geraden Kanten als Beobachtungsmaterial zu Verfügung.

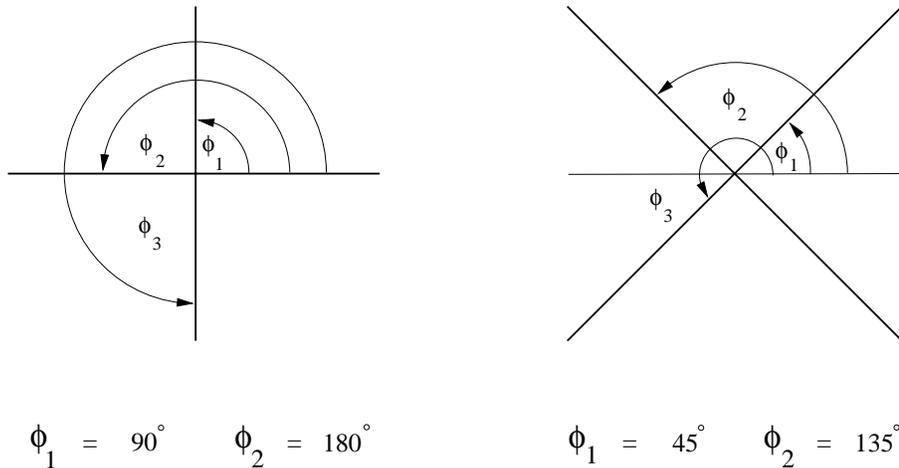


Abbildung 5: Sich orthogonal kreuzende Straßen

## 2.2 Sensormodell

Das Sensormodell beschreibt den Sensor, der dazu verwendet wird, die Eingabedaten für den Prozeß zu erhalten. In unserem Projekt wird die MOMS-02 Kamera verwendet. Wenn die Flughöhe verglichen mit der Oberflächenwelligkeit groß ist and der Blickwinkel klein, können ist eine kleine Differenz zwischen Objekt und Bild zu erwarten. Die Auflösung von 5-6 m im panchromatischen Kanal [vgl. Anhang ...] schränkt die Detektierbarkeit individueller Objekte ein. Aus diesem Grund werden wir Straßen als linienartige , nixht als flachenhafte, Objekte modellieren. Der Multispektralkanal mit einer Bodepixelauflösung von weniger als 10 m scheint für die Straßenextraktion in urbanen Gebieten nicht geeignet zu sein.

## 2.3 Bildmodell

Das Bildmodell beschreibt die erwartete Erscheinung der Objekte im Bild. Es unterscheidet sich formell vom Objekt -und vom Sensormodell.

In unserem Fall kann die Partitionierung der Karte in Regionen aus für eine detaillierte Geometrie direkt genutzt werden. Wir nehmen an, daß die Elemente der Straßen als helle oder dunkle Linien erscheinen. Es ist zu erwarten, daß sie durch Straßenverkehr, Bäume und natürlich durch das Sensorrauschen gestört sind. Somit kann kein vollständiges Straßennetz rekonstruiert werden. Aus diesem Grund fordern wir auch im Objektmodell nicht den Zusammenhang der einzelnen Straßenelemente.

Das Bildmodell besteht aus der gleichen Partitionierung wie wir sie bereits in 2.1 auf Seite 7 beschrieben haben. Jedoch gehen Straßenelemente partiell verloren, zusätzliche Segmente sind durch lineare Strukturen in den bebauten Gebieten zu erwarten. Alle Segmente werden Fehler in ihrer Länge (meist zu kurz) und ihrer Orientierung aufweisen.

Momentan nehmen wir an, daß maximal 25% aller Liniensegmente gestört sind. Zur Vereinfachung nehmen wir gleichzeitig die Orientierungsfehler als unabhängig von der Länge der extrahierten Liniensegmente an.

## **3 Verfahren**

Inhalt dieses Abschnittes ist die Beschreibung eines Verfahrens zur Rekonstruktion dominant orthogonaler Straßennetze aus extrahierten Linienstrukturen.

### **3.1 Vorverarbeitung und Repräsentation**

Für die Durchführung des eigentlichen Partitionierungsschrittes macht sich eine Vorverarbeitung des Bildmaterials erforderlich. Der Prozeß der Vorverarbeitung ist in Abbildung 7 auf Seite 11 dargestellt und wird nachfolgend beschrieben.

#### **3.1.1 Vergrößerung**

Die Vergrößerung der zu bearbeitenden Bilder ist optional und abhängig von deren ursprünglichen Auflösung. Nutzen wir, wie in diesem Fall, Bilder der MOMS-02 Kamera, vergrößern wir die Bilder um den Faktor 4 und nutzen dafür die bikubische Interpolation. Dies führt zu einer Bodenpixelauflösung von ca.  $1.25m$ .

#### **3.1.2 Linienextraktion**

Zur Linienextraktion nutzen wir das Programm von C. Steger [[6]]. Dieses Verfahren basiert auf den folgenden beiden Eigenschaften von Linienpunkten:

- a) einem kleiner werdenden Gradienten senkrecht zur Linie betrachtet und
- b) einer großen Krümmung senkrecht zur Linie betrachtet

Alle extrahierten Liniensegmente werden vektorisiert in einer Liste zur Verfügung gestellt.

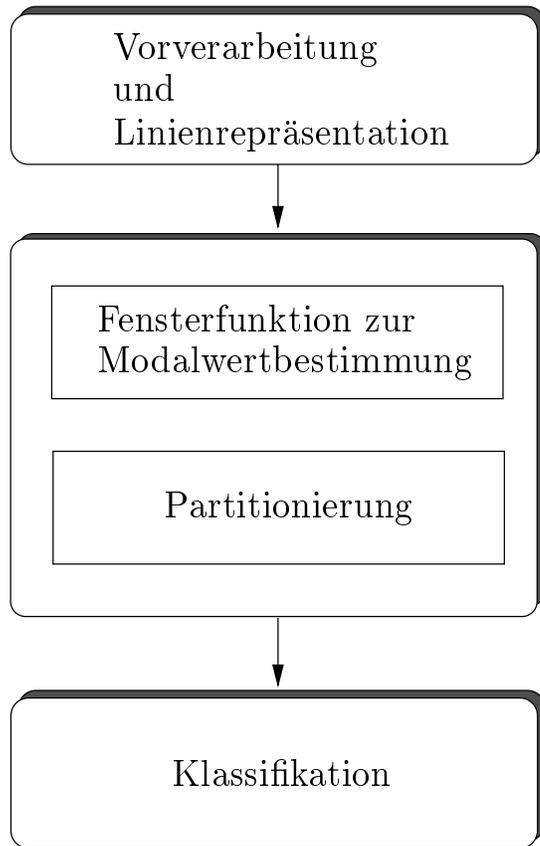


Abbildung 6: Rekonstruktionsverfahren

### 3.1.3 Orientierungsbestimmung

Die Orientierung  $\Phi_{i,j}$  der extrahierten Liniensegmente wird als vierfacher Winkel  $\alpha_{i,j}$  bestimmt. Die Liste der vektorisierten Linien wird um den entsprechenden Wert ergänzt.

### 3.1.4 Liniencodierung und Repräsentation der Kanten

Die Idee des Verfahrens besteht in einer lokalen Analyse der Kantenrichtungen. Die Repräsentation der Richtungen soll die Richtungswinkel  $\phi_{ij}$  der zum orthogonalen Netz gehörigen Straßen in einem Gebiet auf *einen* Wert abbilden und eine einfache Segmentierung ermöglichen. Die unmittelbare Verwendung der Richtungswinkel  $\phi_{ij}$  führt zu Schwierigkeiten wegen der unbekanntenen Vielfachheit  $k$  und der Unstetigkeit der Richtungswinkel beim Übergang über  $\pi/2$ , da z. B.  $89^\circ$  und  $1^\circ$  noch benachbarte Straßenrichtungen darstellen.

Zur Elimination der Vielfachheit  $k$  verwenden wir den vierfachen Richtungswinkel  $\alpha = 4\phi$ . Dann gilt

$$\alpha \bmod 2\pi = 4 \left( \phi + k \frac{\pi}{2} \right) \bmod 2\pi$$

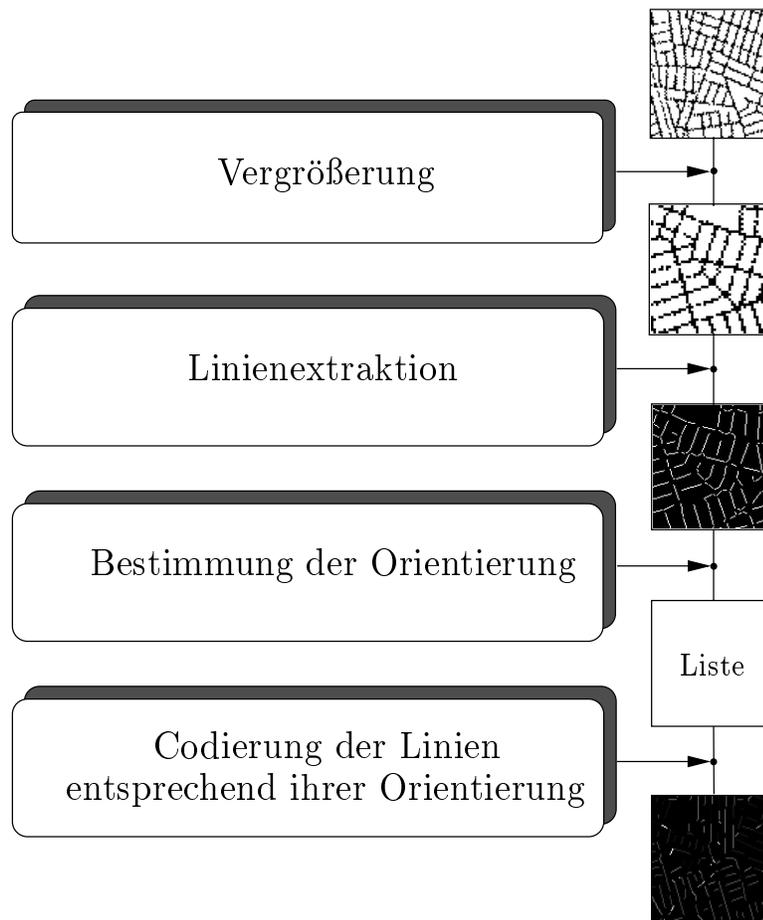


Abbildung 7: Algorithmus zur Vorverarbeitung

$$\begin{aligned}
&= (4\phi + 2k\pi) \bmod 2\pi \\
&= (4\phi) \bmod 2\pi
\end{aligned}$$

Die Richtung  $\phi_{ij}$  zueinander orthogonaler Straßen werden auf dieselbe Richtung  $\alpha_{ij}$  abgebildet. Das Clusterverfahren verwendet die vierfachen Winkel.

Zur Elimination der Unstetigkeit der Winkelfunktion, nun von  $\alpha \bmod 2\pi$ , verwenden wir die normierten Richtungsvektoren:

$$\mathbf{r} = \begin{pmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos 4\phi \\ \sin 4\phi \end{pmatrix} \quad (3)$$

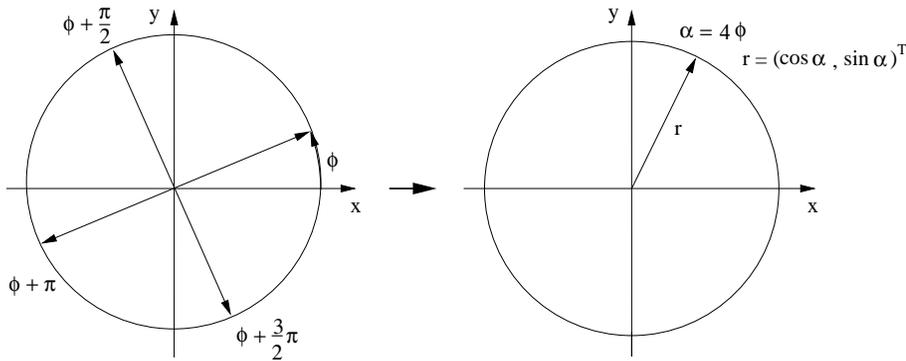


Abbildung 8: Abbildung der Richtungswinkel orthogonaler Kanten auf denselben Wert

Zur Codierung der Liniensegmente entsprechend ihrer Orientierung begeben wir uns wiederum auf die Rasterebene und weisen jedem Pixel eines Liniensegmentes einen Wert entsprechend  $\alpha_{i,j}$  zu.

## 3.2 Segmentierung

Das eigentliche Segmentierungsverfahren ist in Abb. 9 auf der nächsten Seite dargestellt. Die ersten beiden Schritte arbeiten innerhalb eines gleitenden Fensters. Dabei ist die Fenstergröße in Abhängigkeit der mittleren Dichte des Straßennetzes zu adaptieren. Der genaue funktionelle Zusammenhang muß in Folgearbeiten untersucht werden.

### 3.2.1 Modalwertbestimmung

Innerhalb des gleitenden Fensters wird für die richtungscodierten Straßen ein Histogramm aufgebaut, das die Häufigkeiten der jeweiligen Richtung  $\alpha$  enthält. Um die für die lokale Umgebung dominante Richtung zu bestimmen, wird aus

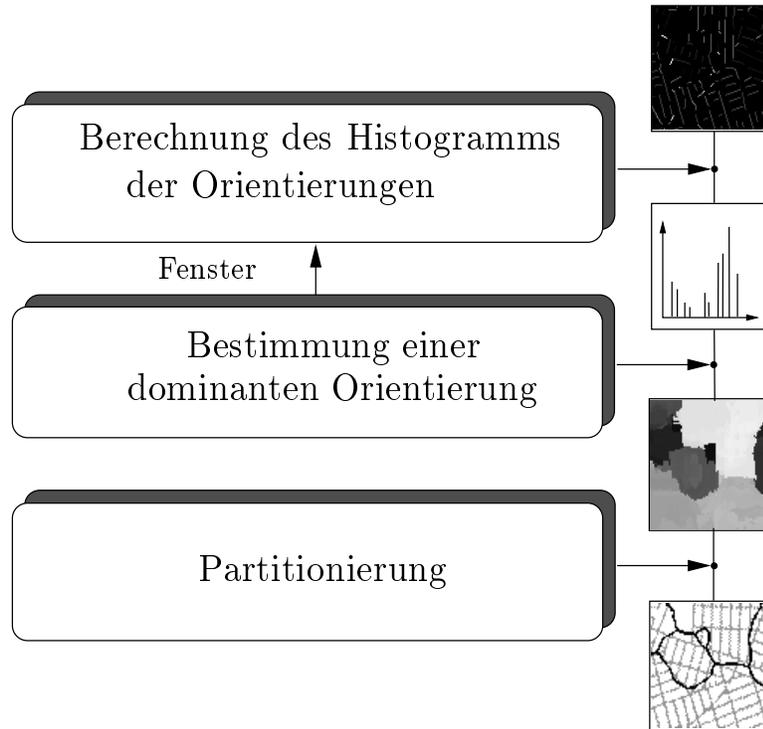


Abbildung 9: Algorithmus zur Segmentierung

dem Histogramm der Modalwert  $\hat{\alpha}$  bestimmt.  $\hat{\alpha}$  ist die Mitte des kürzesten Intervalls im Histogramm von  $\alpha = 4\phi$ , das  $p\%$  aller Häufigkeiten enthält [[4]].  $p$  wird empirisch festgelegt.

Eine Schätzung  $\hat{\phi}$  für  $\phi$  erhält man mit

$$\hat{\phi} = \frac{1}{4}(\hat{\alpha} \bmod 2\pi) \quad (4)$$

### 3.2.2 Partitionierung

Die Partitionierung erfolgt auf dem zweikanaligen Bild der Richtungsvektoren.

Ausgehend von den geschätzten Modalwerten werden jetzt homogene Flächenregionen bestimmt, die die mittlere Richtung innerhalb dieser Regionen repräsentieren. Ein Homogenitätsmaß dient der Entscheidungsfindung, ob ein Element einer lokalen Umgebung als zu einer Region zugehörig interpretiert wird oder nicht. Dieses Homogenitätsmaß wird mit einem zuvor über statistische Test ermittelten Schwellwert verglichen. Das Homogenitätsmaß selbst wird aus der Hessematrix (Matrix der partiellen Ableitungen der geglätteten Bildfunktion) ermittelt [[2]].

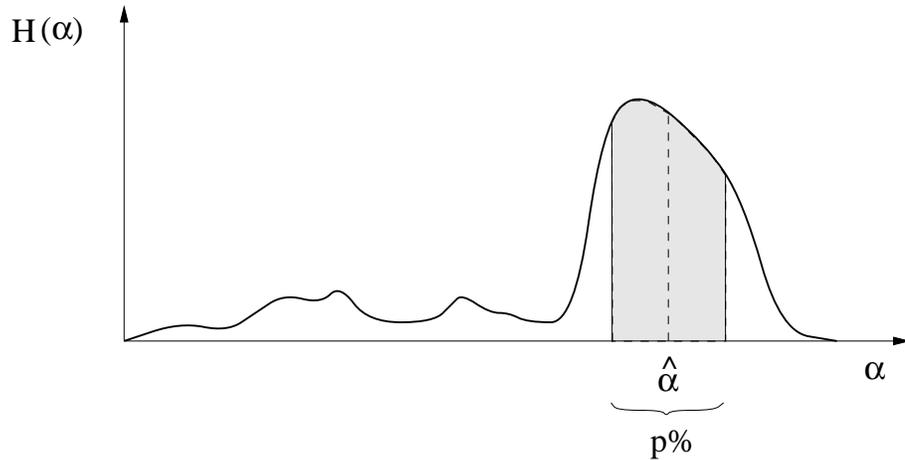


Abbildung 10: Histogramm der Richtungswinkel  $\alpha$ . Die Schätzung des Modalwertes ergibt sich als Mitte des kürzesten Intervalls, das  $p\%$  der Werte enthält. Die Wahl  $p = 0.5$  führt auf die *least-median-square*-Schätzung

### 3.3 Klassifikation

Mit der sich anschließenden Klassifikation soll eine Trennung der Hierarchiestufen des Straßennetzes erfolgen. Die Hierarchisierung eines Straßennetzes geht mit dessen Wachstum einher. Wurde eine Mindestgröße erreicht, fällt den Netzsträngen eine hierarchische Bedeutung zu.

Oberste Hierarchiestufe bilden solche Verbindungen im Netz, die sehr viele andere Stränge an das Netz anbinden. Als solche Verbindungen werden Hauptverkehrsstraßen, Durchgangsstraßen, Umgehungsstraßen, Ausfallstraßen, etc. interpretiert. Die unterste Hierarchiestufe bilden entsprechend Zufahrtsstraßen und kleinere Wege, also solche, die fast ausschließlich die Verbindung einer bestimmten Nutzung zum Netz herstellen.

Die mittlere Hierarchiestufe wird durch alle übrigen Straßen, die aber das eigentlich regional bestimmende Netz ausmachen, gebildet.

Erster Schritt einer Klassifikation ist die Trennung der mittleren Hierarchiestufe von den beiden anderen. Diese Grobklassifikation geschieht durch die Ermittlung einer Richtungsabweichung zwischen geschätzter Richtung  $\hat{\alpha}_{mod}$  einer Region und mittels Segmentierung als mittlere Richtung dieser Region ermittelter Richtung  $\alpha$ .

In Abbildung 8 auf Seite 12 wird bereits auf die der Klassifikation zugrundeliegende Repräsentation der Richtung  $\alpha$  mit Hilfe des Richtungsvektors  $\mathbf{r} = \begin{pmatrix} \cos\alpha \\ \sin\alpha \end{pmatrix}$  hingewiesen. Ausgehend davon läßt sich leicht die gesuchte Richtungsabweichung bestimmen.

Sei  $r_j = \begin{pmatrix} \cos\hat{\alpha} \\ \sin\hat{\alpha} \end{pmatrix}$  der Richtungsvektor der geschätzten Richtung und  $r_i = \begin{pmatrix} \cos\alpha \\ \sin\alpha \end{pmatrix}$ , dann ergibt sich die Richtungsabweichung  $\Delta\alpha$  zu

$$|\Delta\alpha| = \arccos \frac{\langle r_i, r_j \rangle}{|r_i| |r_j|} \quad (5)$$

Liegt  $\Delta\alpha$  unterhalb eines Schwellwertes (vorerst empirisch ermittelt) so werden die entsprechenden Straßen als in die mittelste Hierarchiestufe gehörig klassifiziert. Liegt  $\Delta\alpha$  oberhalb des Schwellwertes, werden die Straßen als über- bzw. untergeordnet klassifiziert. Eine weitere Trennung dieser beiden Hierarchiestufen muß dann als nächster Schritt erfolgen.

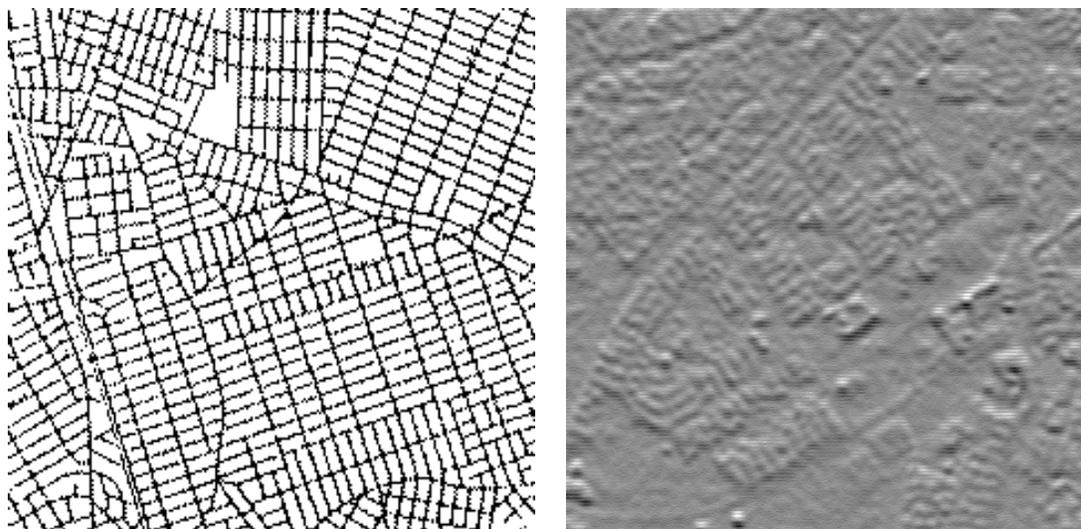
Es ist erkennbar, daß eine solche Vorgehensweise nur zu einer bedingt richtigen Klassifikation führt. Alle Straßen, die parallel zu einer als dominant ermittelten Richtung liegen, werden nicht als über- oder untergeordnet klassifiziert, sondern der mittleren Hierarchiestufe zugeordnet. Dies ist zwar semantisch nicht exakt, soll aber vorerst als für die Erfassung und Modellierung des Straßennetzes unerheblich betrachtet werden.

## 4 Ergebnisse

Im folgenden Abschnitt werden wir Ergebnisse des Segmentierungsverfahrens anhand von zwei Beispielen darstellen (vgl. Abb. 11 auf der nächsten Seite). Als erstes haben wir das Verfahren an einem idealen Kartenausschnitt von New York getestet. Das zweite Beispiel, ein Ausschnitt einer MOMS-02 Aufnahme von Harare, aufgenommen während der D2-Mission, wird die Funktionsfähigkeit des Verfahrens an realen Daten demonstrieren.

**Beispiel 1 (Kartenausschnitt von New York)** :In Abb. 12 auf Seite 17 sind die Ergebnisse der einzelnen Zwischenschritte des Rekonstruktionsverfahrens dargestellt. Von großer Wichtigkeit für das endgültige Partitionierungsergebnis sind die im Bild detektierten Linienstücke (vgl. Abb. 12 auf Seite 17 links oben). Im Vergleich mit dem Original ist eine sehr gute Qualität erkennbar, lediglich einige wenige Linien werden unvollständig detektiert, bzw. winzige Linienstücke werden hinzugefügt. Abb. 12 auf Seite 17 rechts oben zeigt die entsprechend ihrer Orientierung grauwertcodierten Linien. Die dadurch auftretenden Helligkeitsunterschiede lassen bereits unterschiedliche Regionen hervortreten. Diese Regionen werden im Bild der geschätzten Modalwerte, auf dem dann die eigentliche Partitionierung durchgeführt wird, noch deutlicher sichtbar.

Mittels dicker schwarzer Linien wurde das Partitionierungsergebnis dem Originalbild überlagert (vgl. Abb. vreffig:example rechts unten). Folgende Resultate



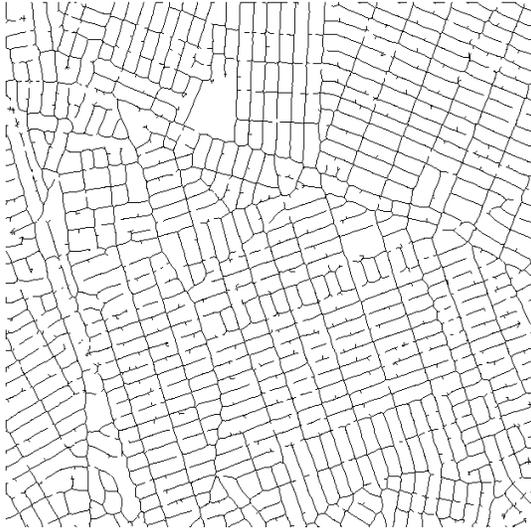
New York

Harare

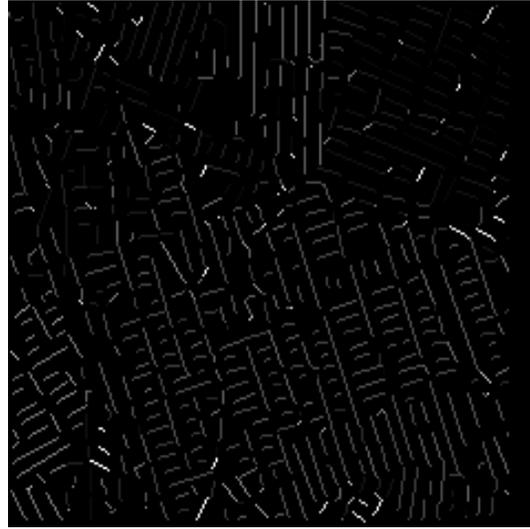
Abbildung 11: Beispieldaten

sind zu erkennen: Die Hauptsegmente sind klar sichtbar und wurden durch den Algorithmus korrekt bestimmt. Die Grenzen der kleinen Regionen in der Bildmitte wurden gut gefunden. Die anderen Regionen weisen Grenzeffekte auf, die durch die für den Segmentierungsalgorithmus verwendete Fenstergröße von ca. 15% der gesamten Karte hervorgerufen werden.

**Beispiel 2 (MOMS-02 Bildausschnitt von Harare)** : Wir zeigen hier lediglich die als Eingangsdaten für das Rekonstruktionsverfahren verwendeten detektierten Linien (Abb. 13 auf Seite 18 links) und das dem Originalbild (aus Visualisierungsgründen mit Robertsoperator bearbeitet) überlagerte Ergebnis des Segmentierungsverfahrens. (Abb. 13 auf Seite 18 rechts). In diesem Bildausschnitt gibt es nur drei Regionen unterschiedlicher Orientierung: Region a) in der Mitte des Bildes und die Regionen b) und c). Diese Regionen werden durch den Segmentierungsalgorithmus gefunden. Allerdings ist das Ergebnis im Vergleich zum Ergebnis des Kartenausschnittes von New York viel schwächer. Der Hauptgrund dafür ist die Irregularität der Dichte des Straßennetzes.



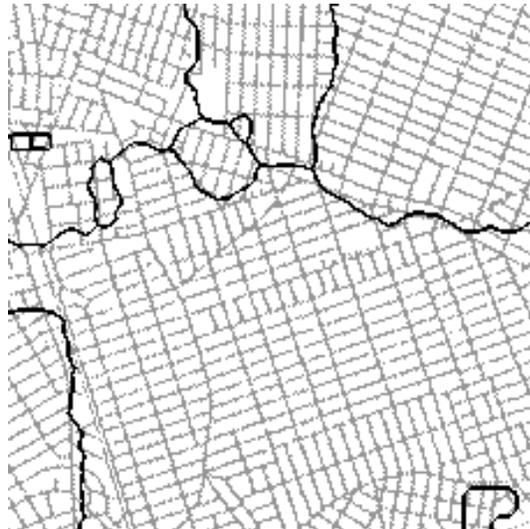
Ergebnis der Liniendetection



Richtungscodierte Linien

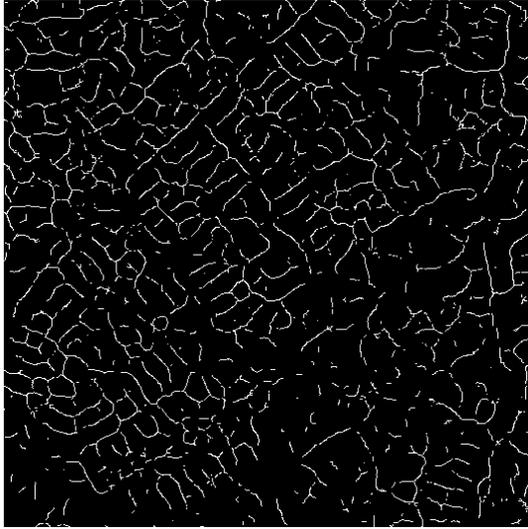


Modalwertregionen

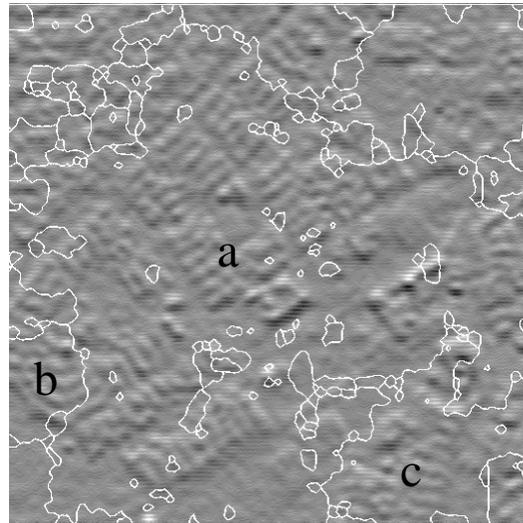


Segmentierung

Abbildung 12: Ergebnisdaten New York



Ergebnis der Liniendetektion



Segmentierung

Abbildung 13: Ergebnisdaten Harare

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Bericht haben wir ein Verfahren vorgestellt, daß in der Lage ist, orthogonale Straßennetze entsprechend ihrer Ausrichtung zu segmentieren. Gleichzeitig ermöglicht das Verfahren mittels eines Klassifikationsschrittes eine Trennung zwischen zum orthogonalen Netz gehörenden und nicht zu diesem gehörenden Straßen (über - oder untergeordnete Straßen) vorzunehmen.

Das Verfahren basiert auf einer lokalen Analyse der Linienrichtungen des Straßennetzes, wobei eine Grauwertcodierung aller extrahierten Liniensegmente entsprechend ihrer Orientierung zugrunde liegt.

Für die Entwicklung des Verfahrens mußten wir Annahmen treffen, die im Kapitel 2 ausführlich dargestellt wurden. Um zueinander orthogonale Straßen auf dieselbe Richtung  $\alpha_{ij}$  abzubilden, wird für die Linien trivialerweise der vierfache Richtungswinkel  $\alpha = 4\phi$  verwendet.

Innerhalb eines gleitenden Fensters wird über die richtungscodierten Straßen ein Histogramm aufgebaut, aus dem die für die lokale Umgebung dominante Richtung bestimmt wird. Ausgehend von den dominanten Richtungen haben wir schließlich in einem Partitionierungsschritt homogene Regionen bestimmt, deren Intensität die mittlere Richtung der jeweiligen Region repräsentiert.

Für die Trennung der zum orthogonalen Netz gehörenden Straßen von den über - bzw. untergeordneten Straßen, ermittelten wir eine Richtungsabweichung  $\Delta\alpha$  und verglichen diese mit einem Schwellwert. In den vorliegenden experimentellen Untersuchungen wurde der Schwellwert bislang nur empirisch ermittelt. An

dieser Stelle können weiterführende Untersuchungen anschließen, um den Prozeß der Schwellwertbestimmung zu automatisieren.

In einem letzten Abschnitt haben wir die Funktionsfähigkeit des entwickelten Verfahrens sowohl an idealen (Kartenausschnitt von New York) als auch an realen Daten (MOMS02 Bildausschnitt von Harare) demonstriert. Im Gegensatz zu dem idealen Beispiel liefert das Verfahren für die realen Daten ungenauere Segmentränder, was jedoch auf die vorhandenen stark verrauschten Daten zurückzuführen ist. Die wesentlichen Segmente werden gefunden. Zusätzlich zu den bereits erwähnten Einflüssen auf die Qualität des Segmentierungsergebnisses müssen wir auch berücksichtigen, daß der verwendete Bildausschnitt von Harare (mangels anderer MOMS02-Daten) nur wenige dominant orthogonale Strukturen enthält, so daß sich eine Verifizierung des Verfahrens bei Vorhandensein entsprechenden Datenmaterials anbietet.

Um die Ergebnisse des Verfahrens zu verbessern, sind folgende weitere Schritte geplant:

- Die Orientierungsdaten der Straßen werden durch eine Distanztransformation, die die Orientierungen in den Nachbarschaften berücksichtigt, auf die Gebäudeblöcke übertragen. Das wird die Robustheit des Verfahrens, unter Berücksichtigung der varriierenden Dichte des Straßennetzes, erheblich verbessern.
- Die geschätzten Orientierungen werden zur Verbesserung der Liniensextraktion genutzt, um so die Orientierungsfehler der extrahierten Straßensegmente herabzusetzen.

Schließlich wird die Gruppierung der Straßensegmente zu einer ersten Beschreibung des Straßennetzes führen.

## Literatur

- [1] G. Curdes. *Stadtstruktur und Stadtgestaltung*. Verlag W. Kohlhammer, 1997.
- [2] C. Fuchs. Feature extraction. In Winter St. Förstner, W., editor, *Proceedings of Second Course in Digital Photogrammetry*. Institut für Photogrammetrie, Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen, 1995.
- [3] H. P. Geering. *Regelungstechnik*. Springer Verlag, 1994.
- [4] P. Meer, D. Mintz, and A. Rosenfeld. Robust Recovery of Piecewise Polynomial Image Structure. In *Proc. of IEEE Workshop on Robust Computer Vision*. IEEE Computer Society Press, Sept/Oct. 1990.
- [5] R. Sennet. *Civitas: Die Großstadt und die Kultur des Unterschieds*. 1991.

- [6] C. Steger. Extraction of curved lines from images. Technical report, Forschungsgruppe Bildverstehen, Informatik IX, Technische Universität München, Orleanstraße 34, 81667 München, Germany, 1996.