



Institut für **P**hotogrammetrie und Geo**I**nformation
Universität Hannover

Diplomarbeit

Analyse von Fernerkundungsdaten für automatische Straßenextraktionsverfahren



Christian Lucas

Oktober 2003

Hiermit erkläre ich, die vorliegende Diplomarbeit selbstständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln angefertigt zu haben.

Hannover, den 06.10.2003



Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1 Die Einführung in das Thema	1
1.2 Die Zielsetzung und Inhalt der Arbeit	2
2. Automatische Extraktion von Straßen aus digitalen Bildern	4
2.1 Die Modellierung von Straßen	4
2.1.1 Die Modellierung von Straßen nach Wiedemann	5
2.1.2 Die Modellierung von Straßen nach Baumgartner	6
2.2 Das genutzte Verfahren zur Extraktion von Straßen	8
3. Verifikation von Straßendaten des ATKIS-Basis-DLM	11
3.1 Die Strategie zur Aktualisierung	11
3.1.1 Die Vorverarbeitung	11
3.1.2 Die wissensbasierte photogrammetrische Komponente	14
3.1.3 Die Nachbearbeitung	14
3.2 Die Nutzung und der Export der ATKIS-Daten	15
3.3 Die Verifikationssoftware Quala	15
4. Erzeugung der Kanäle zur Straßenverifikation im offenen Gelände	22
4.1 Das verwendete Bildmaterial	22
4.1.1 Die Orthophotos der Landesvermessung Nordrhein-Westfalen	22
4.1.2 Die Orthophotos der Landesvermessung Hessen	24
4.2 Die Betrachtung der Kanäle	26
4.2.1 Die RGB Farbtrennung	26
4.2.2 Die IHS Transformation	27
4.2.3 Die Hauptachsentransformation	29
4.3 Die Strategie der Untersuchungen	31
4.3.1 Die Prozedur A	32
4.3.2 Die Prozedur B	33
5. Untersuchungen und Ergebnisse im Datensatz Nordrhein-Westfalen	35
5.1 Die Untersuchungen der Prozedur A	35
5.1.1 Die Verifikation von Straßen mit positiven Eingangsdaten	35
5.1.2 Die Sensitivitätsanalyse	44
5.1.3 Die Verknüpfung der Verifikation mit positiven und negativen Eingangsdaten	49
5.1.4 Die Analyse mittels Grauwertprofilen	51
5.1.5 Die Verifikation von Baumreihen	58



5.1.6 Die Ergebnis der Prozedur A	65
5.2 Die Untersuchungen der Prozedur B	67
5.2.1 Die Untersuchungen der Parameter	67
5.2.2 Die Verknüpfung vorläufiger Parameter	73
5.2.3 Die Überprüfung angepasster Parameter an Baumreihen	77
5.2.4 Die Zusammenfassung der Prozedur B	78
6. Untersuchungen im Datensatz Hessen mit Vergleich zum Datensatz Nordrhein-Westfalen	80
6.1 Die Untersuchungen der Prozedur A	80
6.1.1 Die Verifikation von Straßen mit positiven Eingangsdaten	80
6.1.2 Die Sensitivitätsanalyse	83
6.1.3 Die Verknüpfung der Verifikation mit positiven und negativen Eingangsdaten	84
6.1.4 Der Vergleich der Datensätze Hessen und Nordrhein-Westfalen	85
6.2 Die Untersuchungen der Prozedur B	87
6.2.1 Der Vergleich der Verifikation mit angepassten und festgesetzten Parametern	88
6.2.2 Der Vergleich der Verifikation mit angepassten Parametern im Datensatz Hessen und Nordrhein-Westfalen	90
6.3 Die Bewertung des Bildmaterials	92
7. Zusammenfassung und Ausblick	93
7.1 Die Zusammenfassung	93
7.2 Der Ausblick	94
Literaturverzeichnis	96
Abkürzungsverzeichnis	98
Abbildungsverzeichnis	99
Tabellenverzeichnis	101
Anhang	102
A.1 Die festgesetzten Parameter zur Steuerung der Verifikation	102
A.2 Die angepassten Parameter zur Steuerung der Verifikation im Kanal Rot, der ersten Hauptachse und der Sättigung	103
A.3 Die angepassten Parameter zur Steuerung der Verifikation im Kanal Grün und im Intensitätskanal	104
A.4 Die angepassten Parameter zur Steuerung der Verifikation im Kanal Blau	105
A.5 Die angepassten Parameter zur Steuerung der Verifikation im Kanal des Farbtons	106



1. Einleitung

1.1 Die Einführung in das Thema

Seit Anbeginn der Menschheit ist diese damit beschäftigt, Verbindungen in Form von Wegen zwischen den Orten ihres täglichen Lebens anzulegen. Damit einher ging auch die Notwendigkeit, selbige in Karten festzuhalten. Mit zunehmender Industrialisierung wuchsen die Ausmaße des so entstandenen Netzwerkes. Damit stieg unter anderem der Bedarf nach einer Datenbank, welche die Möglichkeit hat, diese und weitere geographische Informationen zur Verfügung zu stellen. Das konnte durch Geoinformationssysteme (GIS) realisiert werden.

Diese Geoinformationssysteme hielten in die verschiedensten Bereiche der Wirtschaft Einzug, da sie Geo-Daten bereitstellten, die für die Produktivität und Logistik bedeutend sind. Die Verflechtung der Wirtschaft mit diesen Systemen beginnt bereits bei der Standortsuche, die unter den Bedingungen der absoluten Wegkosten- und Wegzeitenminimierung durchgeführt wird.¹ Des Weiteren ist heutzutage jeder Wirtschaftsbereichbereich auf logistische Transaktionen angewiesen. Dabei belegten Studien, dass allein durch aktuelle Routenplanungen in diesem Bereich Einsparungen von 10% bis 15% möglich sind.² Um wettbewerbsfähig zu bleiben, ist es unerlässlich auf solche Ressourcen zurückzugreifen. Diese kommen letztlich auch der Bevölkerung in Form von Preissenkungen und Entlastungen des Individualverkehrs zugute. Damit wuchs im Gegenzug der Anspruch an die Geo-Datensysteme in Bezug auf Qualität und Aktualität, dem nachgegangen werden muss. Das ist über verschiedene Wege der Geodäsie zu erreichen. Besonders geeignet, durch den Anspruch an zeitnahe, flächendeckende und kostengünstige Lösungen erschien die Photogrammetrie, welche die Möglichkeit der Luftbilddauswertung bietet.

¹ [ROSNER UND KAUFMANN, 2001]

² [INTEND, 2003]



Um die so erzielten Daten schnellstens in das Geo-Datensystem zu implementieren bzw. das System damit bezüglich seiner Vollständigkeit kontrollieren zu können, bietet es sich an, diese Auswertung der Luftbildaufnahmen zu automatisieren. Im Zuge der hier thematisierten Straßenverarbeitung handelt es sich dabei um Verfahren zur Straßenextraktion.

Deren Erfolg ist zwangsweise von der Qualität, der Auswahl und der richtigen Verarbeitung des eingehenden Bildmaterials abhängig, mit der sich diese Arbeit beschäftigt.

1.2 Die Zielsetzung und Inhalt der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, die Vielzahl der zur Verfügung stehenden Arten von Fernerkundungsdaten durch eine Auswahl an Analysen und Tests bezüglich ihrer Eignung für automatische Straßenextraktionsverfahren zu beurteilen. Bei den Fernerkundungsdaten handelt es sich um handelsübliche Orthophotos, aus welchen die Kanäle Rot, Grün und Blau, sowie der Kanal der ersten Hauptachse, der Intensitätskanal, der Kanal des Farbtons und der Sättigungskanal erzeugt werden. Von speziellem Interesse sind die Eigenschaften der einzelnen Kanäle, da sich im Zuge der Verifikation für einen Kanal entschieden werden muss. Dabei wird auch auf potentielle Fehlerquellen, wie sie beispielsweise von Baumreihen in Straßennähe dargestellt werden, eingegangen. Dem folgend soll diesen kanalspezifischen Gegebenheiten ein Parametersatz zur Steuerung der Straßenextraktion angepasst werden. Dies ist nötig, da momentan ein Parametersatz genutzt wird, der für panchromatische Aufnahmen erstellt wurde. Ziel ist es, durch diese Verfahrensweise das Potential, welches die Fernerkundungsdaten besitzen, voll auszuschöpfen. Um die erzielten Resultate in ihrer Aussagekraft auf eine breitere Basis zu stellen, werden diese im Anschluss durch Fernerkundungsdaten anderer Herkunft bestätigt.

Um das zu verwirklichen, ist die Arbeit wie folgt gegliedert :

Im Kapitel 2 wird die automatische Extraktion von Straßen aus digitalen Bildern erörtert. Es wird darin eingangs auf zwei aufeinander aufbauende Modellierungen eingegangen, die folgend für das erläuterte Verfahren der Extraktion unerlässlich sind.



Das Kapitel 3 behandelt die Verifikation von Straßendaten des ATKIS-Basis-DLM. Dabei wird eingangs die zugrundegelegte Strategie zur Aktualisierung erläutert, in deren Komponenten speziell auf die Zweckmäßigkeit und Nutzung von Vorwissen eingegangen wird. Darauf aufbauend werden die Rahmenbedingungen der Implementierung dieser Daten in das System erörtert. Anschließend wird die Verifikationssoftware Quala in ihren sechs Modulen dargelegt.

Das Kapitel 4 gibt einen Überblick über das Eingangsmaterial in Form der Fernerkundungsdaten. Es wird beginnend die Herkunft des verwendeten Bildmaterials eingehend erläutert. Dem schließt sich die Betrachtung der Kanäle an, welche die Erzeugung dieser aus Orthophotos beinhaltet. Des Weiteren wird die Strategie der folgenden Untersuchungen erläutert.

Im Kapitel 5 werden die Untersuchungen und Analysen für den Datensatz Nordrhein-Westfalen durchgeführt. Es werden die Resultate vorgestellt, wie sie bei den vorangegangenen Untersuchungen kanalweise in den Verifikationen, den Grauwertanalysen und den Tests mit Baumreihen erzielt wurden. Bezugnehmend darauf wurde folgend ein kanalweise angepasster Parametersatz zur Steuerung erstellt.

Im Kapitel 6 werden die bereits durchgeführten Untersuchungen nun zum Teil erneut, jedoch mit hessischen Eingangsdaten ausgeführt. Von speziellem Interesse ist dabei der Vergleich mit dem Kapitel 5 bezüglich auftretender Parallelen.

Das Kapitel 7 bildet den Abschluss mit einer bündigen Zusammenfassung der erzielten Resultate und einer Betrachtung bezüglich der Ausblicke.



2. Automatische Extraktion von Straßen aus digitalen Bildern

Die automatische Extraktion und folgend auch die Verifikation von Straßen ist ein Thema, welches z.B. durch weitgehende Verbreitung von Autonavigationssystemen oder durch Erstellung verschiedenster Geoinformationssysteme (GIS) basierend auf Geo-Daten für kommerzielle Nutzungen immer interessanter wird. Um diese automatische Extraktion zu perfektionieren und eine Nachbearbeitung durch einen Operateur geringer zu gestalten, beschäftigt man sich seit nahezu zwanzig Jahren mit diesem Thema.³ Zur Durchführung ist eine Vielzahl von Vorüberlegungen nötig. Diese umfassen z.B. die Modellierung von Straßen und die Grundlagen der Extraktionsalgorithmen, welche in diesem Kapitel erläutert werden.

2.1 Die Modellierung von Straßen

Es muss ein allgemein gültiges Modell formuliert werden, welches einem Computer erlaubt, Straßen in Luft- und Satellitenbildern auch als solche zu erkennen. Dafür müssen Parameter definiert werden, die es gestatten, das Objekt Straße mit großer Sicherheit zu erkennen. Dabei stellen andere linienhafte Objekte, wie Flüsse, Baumreihen oder die Verdeckung der Straße durch Schatten, Autos oder Brücken ein grundlegendes Problem dar. Aus diesem Anlass ist es wichtig die Eigenschaften, Besonderheiten und Unterschiede genau zu beschreiben. Dazu findet sich in der Literatur eine Vielzahl verschiedener Ansätze, von denen folgend die hier relevanten Modellierungen von [WIEDEMANN, 2002] und [BAUMGARTNER, 2003] näher erläutert werden.

³ [WIEDEMANN, 2002]



2.1.1 Die Modellierung von Straßen nach Wiedemann

Bei [WIEDEMANN, 2002] wird die Modellbildung am Originalobjekt orientiert vollzogen. Das bedeutet, dass von den offensichtlichen Eigenschaften der Straßen die Bildeigenschaften abgeleitet werden, welche sich anschließend in drei Klassen unterteilen. Straßen sind in ihren Ausmaßen annähernd konstant, nach oben und unten begrenzt in ihrer Breite (1), haben nutzungsbedingt einen harten Ober- und Unterbau (2), sind statische Objekte, die kaum Veränderungen unterliegen (3) und eine homogene Oberfläche zwecks Befahrbarkeit haben (4). Sie sind weiterhin langgestreckte Verbindungswege (5), die aus technischen Gründen meist geradlinig sind bzw. sich durch eine begrenzte Krümmung auszeichnen (6) und kaum Steigung besitzen (7). Straßen weisen dadurch, dass sie in Wechselwirkung mit ihrer Umwelt treten, einen lokalen Kontext auf (8), bilden ein hierarchisches Netzwerk durch bedeutungsabhängige Verbindungen (9) und haben ein vom globalen Kontext abhängiges Erscheinungsbild (10). Dieses legt speziell die großräumige Umgebung der Straße fest, die [WIEDEMANN, 2002] unterteilt in: *Siedlung (urban)*, *Wald (forest)* und *offene Landschaft (agrar)*. Diese zehn Punkte lassen sich durch Betrachtung feststellen. Dafür gilt es, ein allgemein gültiges Modell zu finden. Veranschaulicht wird dies durch die Übertragung dieser Eigenschaften in die folgenden Modellkomponenten. Straßen im Bild sind schmale Linien mit nahezu konstanter Breite (1), die einen absoluten Grauwertbereich besitzen (2), die in mehreren Bildern eine konstante Lage aufweisen (3), die einen homogenen Grauwert haben (4), als lange Linien (5) mit beschränkter Krümmung erscheinen (6), deren Steigung mittels eines DOM bestimmbar ist (7), die sich durch den lokalen Kontext ausweisen (8), die bedeutungsvolle Punkte verbinden (9) und sich durch einen typischen globalen Kontext auszeichnen (10).

Diese Modellpunkte lassen sich durch Betrachtung der Eigenschaften gliedern. Die erste Komponente aus diesem Tripel heisst *lokale Ebene* und wird durch die Punkte (1) bis (3) repräsentiert. Sie beschreibt im einzelnen die Pixeleigenschaften. Genauer bedeutet dies, dass Eigenschaften wie die Grauwerte oder die Zugehörigkeit zu einer Linienpixelkette entscheidend sind. Betrachtet man die Eigenschaften unter den Prämissen der geometrischen und radiometrischen Funktionen, wird dies durch die Modellkomponenten (4) bis (8) vertreten. Diese werden folgend *regionale Ebene* genannt. Die *globale Ebene* bildet die dritte Komponente, welche die funktionalen und topologischen



Eigenschaften beschreibt. Das wird durch die noch fehlenden Punkte (9) und (10) ausgedrückt, welche im weiteren Verlauf eine an das jeweilige Straßenmodell angepasste Steuerung der Suchparameter erlauben.

Durch die anschauliche und einfache Modellierung sind die Ansprüche, die das Modell an das jeweilige Bildmaterial stellt, sehr gering, da es in seinen Betrachtungen nicht auf Feinheiten eingeht, die nur in Bildern hoher Qualität erkennbar sind. Das bedeutet, dass es für das Modell nach [WIEDEMANN, 2002] nicht nötig ist, z.B. Straßenmarkierungen oder ähnlich schmale Objekte erkennen zu können. Daraus ergibt sich, dass gut mit Bildern niedriger Auflösungen, also oberhalb einer Pixelgröße am Boden von 1-2 m, gearbeitet werden kann.

2.1.2 Die Modellierung von Straßen nach Baumgartner

Im dreischichtigen Modell von [BAUMGARTNER, 2003] wird speziell auf auflösungsspezifische Unterschiede eingegangen. Es wird differenziert zwischen einer hohen Auflösung, die Grundpixelgrößen von bis zu 0,5 m besitzt und einer reduzierten Auflösung, die alles beinhaltet, was diese Grenze übersteigt. In dieser Arbeit ist die Betrachtung der hohen Auflösung nicht nötig, da die Pixelgröße künstlich auf das Vierfache verschlechtert wird, um bei der Straßenextraktion von linienhaften und nicht von flächenhaften Objekten ausgehen zu können. Die so geschaffene Auflösung wird im Weiteren als P2-Ebene bezeichnet. Dennoch wird auf beide Auflösungsstufen eingegangen, da sie Bestandteile der Modellierung sind.

Bei [BAUMGARTNER, 2003] wird eine Unterteilung in die *reale Welt-Ebene*, die *Geometrie- und Material-Ebene* und die *Bild-Ebene* vorgenommen. Auf die Unterschiede in der Betrachtung bezüglich der Auflösung, wird jeweils eingegangen. Die *reale Welt-Ebene* beinhaltet das Straßennetz, wie es sich in der Natur darstellt. Genauer gesagt stellt sie also das zu extrahierende Objekt und seine Relationen dar. Das bedeutet, dass das Straßennetz in der P2-Ebene aus Kreuzungen, verbunden durch Straßen besteht. Durch die Betrachtung in hoher Auflösung unterteilen sich die Straßen noch in kürzere Abschnitte, wie Fahrbahn, Markierungen o.ä.. Die *Geometrie- und Material-Ebene* hat in der reduzierten Auflösung keinerlei Bedeutung. In hoher Auflösung werden z.B. Kreuzungen als „meist kompakte Beton- oder Asphaltflächen“⁴ gesehen.

⁴ aus [BAUMGARTNER 2003]



Objekte werden also hinsichtlich ihrer 3D-Gestalt und ihrer Materialeigenschaften betrachtet. Die *Bild-Ebene* stellt die Objekte, abhängig von Sensor und Blickrichtung in der P2-Ebene, als helle Punkte oder helle Linien dar. In der höheren Auflösung wird dies differenzierter betrachtet. Hier werden die aus der reduzierten Auflösung schon bekannten hellen Linien weiter unterteilt in lange und kurze helle Linien und in langgestreckte helle Flächen.

Aus dieser differenzierten Betrachtung heraus ist zu erkennen, dass die Anforderungen der Modellierung an das Bildmaterial laut [BAUMGARTNER, 2003] hoch sind, obwohl eine reduzierte Auflösung getrennt berücksichtigt wird. Es ist aber davon auszugehen, dass die Modellierung in gewissen Fällen auf die höhere Auflösungen angewiesen ist, um optimale Ergebnisse zu gewährleisten. Dies ist beispielsweise im städtischen Bereich denkbar.

Bei [BAUMGARTNER, 2003] wird des Weiteren eine Unterscheidung bezüglich der Lage einer Straße getroffen. Durch die verschiedenen Umlandformen und Landnutzungsarten erscheint dies sinnvoll, da die Erkennbarkeit zwingend von Objekten der direkten Nachbarschaft abhängt. Dabei ergibt sich der *globale* und der *lokale Kontext*. Diese kontextspezifische Unterteilung ist auch schon bei der Modellierung von [WIEDEMANN, 2002] angewandt worden. Dabei stellte sie jedoch nur einen Bestandteil und nicht eine getrennte Betrachtung dar. Im *globalen Kontext* wird zwischen den drei Regionen *Siedlung*, *Wald* und *offene Landschaft* unterschieden. Durch diese Untergliederung kann im Weiteren auf die räumlich bezogenen Unterschiede im *lokalen Kontext* eingegangen werden. Der *lokale Kontext* berücksichtigt den spezifischen Einfluss auf die drei oben genannten Regionen. Als Beispiel wäre zu nennen, dass im *globalen Kontext* *Wald* mit sehr vielen Überdeckungen durch Bäume zu rechnen ist. In der Kontextregion *Siedlung* ist speziell auf Störungen durch Schattenwurf der Häuser oder durch Fahrzeuge einzugehen.

Die Kontextregion *offene Landschaft* ist unter diesen Prämissen betrachtet am „störungsfreisten“. Aus diesem Grund wird sich diese Arbeit auch ausschließlich mit der *offenen Landschaft* befassen, da im Vordergrund die Analyse der Praktikabilität unterschiedlicher Fernerkundungsdaten bzw. Kanäle steht und nicht auf kontextspezifische Probleme einzugehen ist.



2.2 Das genutzte Verfahren zur Extraktion von Straßen

Das Verfahren zur Extraktion von Straßennetzen aus digitalen Bilddaten ist zu untergliedern in die Extraktion linearer Strukturen und eine darauf aufbauende Extraktionsstrategie zum Extrahieren von Straßennetzen.

Die Grundlage zur Verifikation von Straßen bildet das Verfahren zur Extraktion linearer Strukturen (Linien). Bei [STEGGER, 1998] wird dies wie folgt erklärt: In den digitalen Bilddaten zeichnen sich die linearen Strukturen, welche extrahiert werden sollen, dadurch aus, dass sie in der Regel heller oder dunkler als ihre Umgebung erscheinen. Das bedeutet, dass die Linie senkrecht zu ihrem Verlauf ein charakteristisches Grauwertprofil aufweist, welches jeweils ein Maximum oder ein Minimum besitzt. Deutliche Linien weisen zudem noch eine starke Krümmung im Schnittpunkt des Grauwertprofils auf, die für jeden Bildpunkt durch die Richtung der Linie und der ersten und zweiten Ableitung senkrecht zur Linienrichtung bestimmt wird. Ist dies geschehen und liegen die so bestimmten Parameter zwischen vorgegebenen Mindest- und Maximalwerten, wird der Bildpunkt der Menge der Linienpunkte hinzugefügt. Im Anschluss werden die individuell bestimmten Linienpunkte vom Startpunkt aus zu Pixelketten durch jeweiliges Hinzufügen des benachbarten, richtungsmäßig kompatiblen Bildpunktes gebildet. Die Startpunkte hierfür sind Linienpixel, die eine Krümmung besitzen, welche einen vorgegebenen Schwellwert übersteigt. Nun liegt eine erste Linienpixelkette vor. Anschließend wird noch eine Korrektur der Linienposition vorgenommen, da diese durch unterschiedliche Helligkeiten auf den beiden Seiten der Linie verschoben sein kann. Die extrahierten Linien liegen als topologisch korrekte subpixelgenaue Pixelkette vor.

Im Weiteren muss überprüft werden, ob die extrahierte Linie in das Modellbild der Straßennetze passt. Dazu wird bei [WIEDEMANN, 2002] eine Zweiteilung vollzogen. Es wird anfangs eine vorläufige Extraktion durchgeführt, die zum Ziel hat, unter Berücksichtigung der Modellierung das Straßennetz möglichst vollständig und korrekt zu extrahieren. Das heisst im einzelnen, dass die linienhaften Strukturen als erstes durch Verwendung einer Regressionsgeraden geglättet und anschließend die Stellen, die weiterhin eine vorgegebene Krümmung überschreiten, aufgebrochen werden. Dies geschieht, da die Linien erfahrungsgemäß ihre Bedeutung an Stellen großer Krümmung ändern.



Daraufhin werden die Linienpixelketten bewertet, um ein vorläufiges Maß der Extraktion über die Qualität zu haben. Realisiert wird dies durch Eigenschaften wie: Geradlinigkeit, Breite und Breitenvariation, Länge, und Grauwertvariation. Diese werden jeweils mit einem Wert zwischen 0 und 1 bewertet. Anschließend werden die einzelnen Bewertungen durch einen FUZZY-UND Operator zu einer entgültigen Bewertung zusammengefügt. Diese einzelnen Bewertungen finden nach festgelegten Parametern statt. Das zeigt exemplarisch die Bewertungsfunktion der Linienbreite in Abbildung 1.

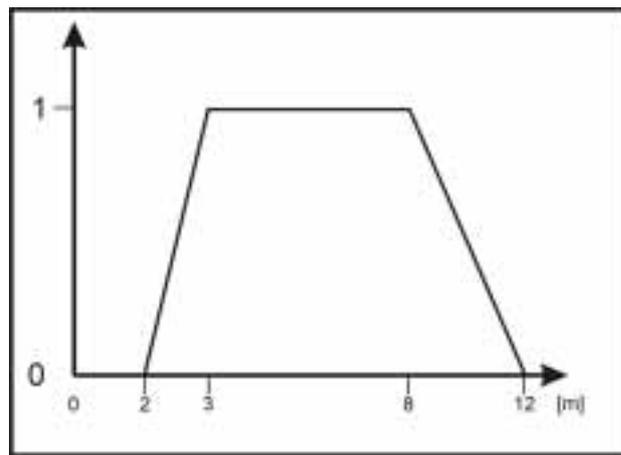


Abbildung 1: Bewertungsfunktion der Linienbreite (fuzzy)

Sollten Daten bzw. extrahierte Linien aus mehreren Sätzen vorliegen, werden diese im nächsten Schritt fusioniert. Dabei wird stets das beste Straßenstück übernommen, welches vom schlechteren nachträglich aufgewertet wird. Dies könnte sich z.B. bei der Extraktion heller und dunkler Straßen ergeben. Nun werden im zweiten Schritt der Extraktion zwischen den gerade fusionierten Straßenstücken Knotenpunkte in Form von Kreuzungen generiert, die anschließend als Startpunkte für die Verknüpfung genutzt werden. Dafür wird jeweils ein kurzer Richtungsvektor angehängen, welcher unterstützend eine gute Bewertung erhält. Dies wird in der Gruppierung durchgeführt, in der die Linien durch Verknüpfungshypothesen und Gewichtungen zu einem Netzwerk verbunden werden. Bei diesen Verknüpfungshypothesen werden z.B. Abstand der zu verbindenden Linienstücke und Kollinearität als lokale Eigenschaften berücksichtigt. Das bedeutet, dass vorläufige Verknüpfungen zwischen den Knotenpunkten und den Kanten gesucht werden, zwischen denen, laut festgelegter Steuerparameter, eine Verbindung aufgebaut werden kann. Diese hypothetische Verknüpfung wird anhand verschiedener Parameter, wie absolute und relative Länge (zwischen Verknüpfung und vorhandenem Straßenstück) und der Richtungsdivergenz bewertet. Des Weiteren ist festgelegt,



dass die Wertung der Verknüpfung nicht besser als die der beteiligten Linienstücke ausfallen darf. Anhand dieser Bewertung werden die Hypothesen beibehalten oder verworfen. Abschließend wird ein Verfahren zur kürzesten Pfadsuche genutzt, um auf diese Weise noch fehlende Verbindungen zu entdecken. Damit ist die Extraktion von Straßennetzen nach dem Schema von [WIEDEMANN, 2002] beendet.



3. Verifikation von Straßendaten des ATKIS-Basis-DLM

Die Verifikation von linienhaften Straßendaten wird mit dem Programm Quala (**Quality Analysis of ATKIS-data**) der Universität Hannover durchgeführt. Dieses wurde im Rahmen des WIPKA-Projektes (**Wissensbasierter Photogrammetrisch-Kartographischer Arbeitsplatz**) entwickelt. Wie schon aus dem Akronym „Quala“ hervorgeht, handelt es sich dabei um Software, die sich mit der Qualitätsanalyse von ATKIS-Daten (**Amtliches Topografisches-Kartographisches InformationsSystem**) beschäftigt. Quala arbeitet in erhöhtem Maße kontext- und objektabhängig, was den Bezug zum ATKIS erklärt. Diesen Zusammenhang und die Strategie zur Aktualisierung gilt es im folgenden näher zu erläutern.

3.1 Die Strategie zur Aktualisierung

Die Strategie zur Aktualisierung ist in zwei Bestandteile gegliedert, die in Abbildung 2 graphisch dargestellt sind. Es ist darin deutlich zu erkennen, dass nach [BUSCH UND WILLRICH, 2002] zwischen den *GIS-Komponenten* und der *wissensbasierten photogrammetrischen Komponente* unterschieden wird. Dabei umfasst die GIS-Komponente den ersten und den letzten Schritt des Systems zur Aktualisierung, bei denen es sich um die *automatische Vorverarbeitung* und die *interaktive Nachbearbeitung* handelt.

3.1.1 Die Vorverarbeitung

Beginnend mit der automatischen Vorverarbeitung werden aus den vorliegenden ATKIS-Daten alle Verknüpfungen zwischen Objektgeometrie und den zugehörigen Attributen hergestellt. Damit wird gewährleistet, dass im späteren Verlauf der Verifikation Vorwissen bzw. die nötigen Informationen zur Verfügung stehen. Das hat sich auch für die Extraktionen bewährt, da es die



Nutzung von Vorwissen ermöglicht, den Suchraum einzuschränken. Dieses äussert sich durch die Erzeugung von Kontextregionen, die den Vorteil haben, dass individuell auf Umlandfaktoren bzw. auf den Einfluss, den diese auf das Objekt Straße haben, eingegangen werden kann.

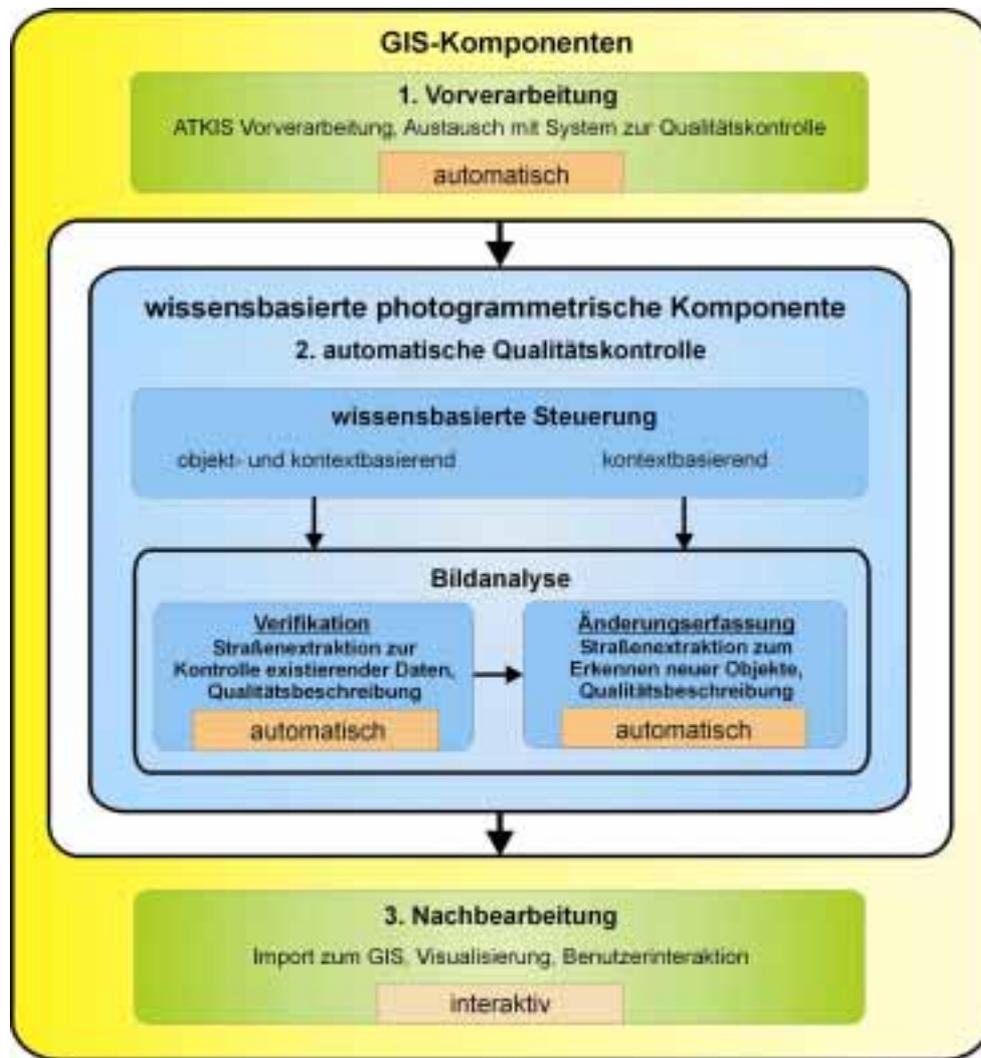


Abbildung 2: Komponenten des Systems zur Aktualisierung ⁵

Die Informationen, die zur Erzeugung der Kontextregionen benötigt werden, kommen aus dem ATKIS-Objektartenkatalog. Dafür werden einzig die flächenförmigen ATKIS-Objekttypen genutzt. Anhand dieser Daten ist es möglich, zwischen sechs Kontextregionen zu unterscheiden. Sie unterteilen sich in: Siedlung, Agrar, Sonderkulturen, Grünland, Wald und Kleinstrukturen. Im wesentlichen beschränkt man sich auf die Unterteilung in *Siedlung*, *Agrar* und *Wald*, da der Bildinhalt damit bereits nahezu lückenlos beschrieben werden kann. Dabei werden die Regionen Sonderkulturen und Grünland der

⁵ nach [BUSCH UND WILLRICH, 2002]



Kontextregion *Agrar* zugeordnet und die Kleinstrukturen werden im Weiteren unter der Region *Siedlung* geführt. Diese Verfahrensweise lehnt sich auch an die Gruppierung des *globalen Kontextes*, bekannt aus der Modellierung, an. Da folgend die Verifikation und die Erfassung der Veränderungen gesondert betrachtet wird, muss auch die wissensbasierte Steuerung zwischen *objekt- und kontextbasierend* und einzig *kontextbasierend* unterscheiden. Aus diesem Grunde wird eine entsprechende Differenzierung bei den Vorinformationen getroffen. Dabei bedeutet *objektbasierend*, dass bei der späteren Steuerung das Wissen über Objekteigenschaften gezielt mit einfließt. Mit Objekteigenschaften sind in diesem Fall speziell Informationen wie Geometrie, Straßenbreite oder Klassifizierung in komplexe Straße, Straße und Weg gemeint. Eine *kontextbasierende* Steuerung bedeutet, dass die Umgebung einer Straße, also der globale Kontext berücksichtigt wird. Damit kann auf die Unterschiede z.B. bezüglich der Abgrenzung der Straße eingegangen werden, die davon abhängig ist, ob sich die Straße im offenen Gelände, im Wald oder in einer Stadt befindet. Das hat insbesondere Einfluss auf den Kontrast zwischen Straße und ihrer Umgebung.

So ist beispielsweise in der Kontextregion *Agrar* damit zu rechnen, dass die Straßen breit, meist geradlinig im Verlauf sind, sich von der Umgebung gut abheben und selten durch Autos oder andere Verdeckungen gestört werden. Im *städtischen Bereich* sind die vorangegangenen Eigenschaften zumeist nicht gegeben. Die Straßen sind in der Regel schmaler, verwinkelt, oft verdeckt durch Schattenwurf oder Störobjekte wie Autos und heben sich nicht sehr deutlich von ihrer Umgebung ab. Dies verdeutlicht den Nutzen kontextbasierter Unterscheidungen bei der Verifikation.

Zusammenfassend kann festgestellt werden:

Die Nutzung der Vorinformationen, gegeben in Form von ATKIS-Daten, bedeutet für die automatische Qualitätskontrolle eine optimale Anpassung an die Gegebenheiten des zu betrachtenden Gebietes. Es werden gezielt Gebiete mit ähnlichen Rahmenbedingungen in Form von Kontextregionen gesondert durch individuell angepasste Steuerparameter betrachtet. Des Weiteren findet noch eine Auswahl bezüglich des Ziels der automatischen Qualitätskontrolle durch Unterscheidung der Steuerparameter, statt. Damit ist es möglich, durch individuelle Betrachtung optimale Ergebnisse zu erzielen.



3.1.2 Die wissensbasierte photogrammetrische Komponente

Der nächste Bestandteil des Systems zur Aktualisierung ist die *wissensbasierte photogrammetrische Komponente*, die im wesentlichen die *automatische Qualitätskontrolle* beschreibt. In dieser wird unterschieden zwischen einer Verifikation und einer Änderungserfassung. Die Verifikation zeichnet sich dadurch aus, dass bereits im ATKIS erfasste Straßen bezüglich ihrer geometrischen Genauigkeit kontrolliert werden. Dabei wird mittels eines Buffers, der um das jeweils zu kontrollierende Objekt erzeugt wird, allein dies überprüft und bezüglich seiner Unterschiede zum vorhandenen ATKIS-Datensatz bewertet. Das stellt auch den Unterschied zur Änderungserfassung dar, da der Schwerpunkt auf der Kontrolle hinsichtlich der Vollständigkeit liegt. Folglich wird die Extraktion auf das gesamte Bild ausgedehnt, was Informationen bezüglich der Geometrie oder einer Bufferbildung überflüssig macht. Eine Bewertung der einzelnen Straße erfolgt diesmal anhand interner Qualitätsparameter und nicht im Bezug auf das vorhandene ATKIS-Basis-DLM. Die wissensbasierte photogrammetrische Komponente unterscheidet des Weiteren bei der Steuerung zwischen objekt- und kontextbasierend für die Verifikation und rein kontextbasierend für die Änderungserfassung, auf deren Zweckmäßigkeit schon in Kapitel 3.1.1 eingegangen wurde. An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass die Änderungserfassung nicht Gegenstand der Arbeit ist. Es wird folgend einzig auf die Verifikation eingegangen. Dennoch sind die Resultate, wie sie in dieser Arbeit erzielt werden, auf die Änderungserfassung anzuwenden, da dieser der gleiche Ansatz zur Straßenextraktion zugrunde liegt.

3.1.3 Die Nachbearbeitung

Bei der Nachbearbeitung werden in einem interaktiven Prozess die Ergebnisse der automatischen Qualitätskontrolle durch einen Operateur nachbearbeitet. Dieser kontrolliert speziell die Daten, die Änderungen im ATKIS-Basis-DLM bedingen. Dabei handelt es sich in erster Linie um die Objekte, die verworfen wurden. Die Automatisierung des Prozesses bereitet momentan größere Schwierigkeiten, auf welche im Zuge der Arbeit nicht weiter eingegangen werden soll.



3.2 Die Nutzung und der Export der ATKIS-Daten

An dieser Stelle wird erläutert, welche Informationen aus dem ATKIS für die Steuerung der automatischen Qualitätskontrolle benötigt werden und wie mit ihnen weiterhin umzugehen ist. Die ATKIS-Daten gliedern sich laut [ADV, 2003] in *Objekte, Objektteile, Objektgruppen, Objektbereiche und Attribute*. Diese bestehen im wesentlichen aus Punkt-, Linien- und Flächendaten, aus welchen in der automatischen Vorverarbeitung mit Hilfe der EDBS (**E**inheitliche **D**aten**B**ank**S**chnittstelle) Linienobjekte und Flächenobjekte mit ihren zugehörigen Attributen selektiert werden. Dazu schneidet man die ATKIS-Daten orthophotoweise auf und erzeugt die Austauschdateien, die einmalig exportiert werden. Das läuft automatisch für jedes Bild in zwei Schritten ab. Dabei wird unterschieden zwischen linienhaften Daten, den sogenannten 'Routes' und flächenhaften Daten, den sogenannten 'Regions'. Im späteren Verlauf werden die linienhaften 'Routes' dazu genutzt, thematische und geometrische Informationen über das Objekt Straße zu erhalten, welche z.B. für die Erstellung der Buffer in der Verifikation unerlässlich sind. Aus den flächenhaften 'Regions' werden die Kontextregionen erzeugt. Dabei wird aufgrund der Genauigkeit der ATKIS-Daten von ± 3 m und um folgend die vollständige Extraktion von Straßen am Rand einer Kontextregion zu ermöglichen, bei der Vorverarbeitung ein Buffer von 5 bis 10 m um die flächenhaften Objekte erzeugt. Importiert werden jeweils drei Austauschdateien, in denen, für die Software Quala lesbar, die geometrischen und thematischen Informationen gespeichert sind. Damit steht der Software Quala das Vorwissen zur Verfügung.

3.3 Die Verifikationssoftware Quala

Ist der Export der ATKIS-Daten abgeschlossen, kann die Verifikation der Straßendaten beginnen. Das geschieht, wie oben schon erwähnt, mit der Software Quala, die von der Universität Hannover in Zusammenarbeit mit dem BKG (**B**undesamt für **K**artographie und **G**eodäsie) im Zuge des WIPKA-Projektes und unter Nutzung des TUM-Ansatzes zur automatischen Extraktion von Straßen entwickelt wurde.

Das Programm ist in drei Module gegliedert. Im ersten Modul werden mit Hilfe der Austauschdaten (vgl. Kap. 3.2) die Kontextregionen gebildet. Dies erfolgt



durch Verbinden der Eckpunkte der jeweiligen Kontextregion. Dadurch werden Flächen gebildet, die im endgültig zu bearbeitendem Bild von der Ausmaskierung ausgenommen werden. Im wesentlichen beschränkt sich das auf die drei Regionen: *Siedlung* (urban), *Wald* (forest) und *offene Landschaft* (agrar). Nötig ist dieser erste Teil der Verifikation, um im weiteren Verlauf des Programms die Parametersteuerung bzw. die Extraktion kontextabhängig durchführen zu können (vgl. Kapitel 3.1.1). Um ein möglichst fehlerfreies Ergebnis zu erhalten, wird folgend ein Dilatationsradius um die Kontextregion erzeugt und damit verhindert, dass eventuell am Rand befindliche Straßen abgeschnitten und somit fehlextrahiert werden.

Im zweiten Teil der Software findet im wesentlichen die Extraktion linienhafter Strukturen bzw. Straßen statt. Dazu wird nach hellen oder dunklen Pixelketten gesucht, die im Verlauf einen annähernd konstanten Grauwert aufweisen. Das erfolgt nach dem schon im Kapitel 2.2 beschriebenen Verfahren von [WIEDEMANN, 2002]. Die Prozedur findet hingegen in einem Bufferfenster statt, das jeweils nur ein linienhaftes ATKIS-Objekt beinhaltet. Auf die Art wird das Bild objektweise abgearbeitet. Realisiert wird die Bufferbildung, indem man das aus Knoten und Polygonen bestehende ATKIS-Objekt selektiert und in Abhängigkeit der jeweiligen Straßenbreite und Geometrie einen individuellen Buffer erzeugt. Diesen wählt man größer als die jeweilige Straße, um eine gewisse Lageungenauigkeit der Straße abzufangen und die Extraktion dadurch unbeeinflusst zu lassen. Der Buffer legt zu dem eine Grenze der geometrischen Genauigkeit fest, deren Überschreitung das Verwerfen der jeweiligen Straße bedingt. Durch die Einschränkung des Suchraumes auf einen Buffer ist es des Weiteren nötig, Startpunkte vorzugeben, die man aber aus den ATKIS-Daten entnehmen kann. Zusätzlich wird noch ein kleiner Richtungsvektor angehängen, der standardmäßig die höchste Bewertung bekommt. Diese Startpunkte mit Richtungsvektoren werden im Weiteren als *seed Vektoren* bezeichnet. Die Unterstützung der Extraktion durch die Zuhilfenahme der *seed Vektoren* hat sich in einer Vielzahl von Tests in der Entwicklungsphase ergeben und seitdem bewährt.

Die Extraktion nach dem Verfahren von [WIEDEMANN, 2002] wird in sechs einzelne Prozeduren gesplittet, die einzeln die Parameter zur Steuerung beinhalten. Auf diese soll im Weiteren kurz tabellarisch in den Tabellen 1 bis 6 mit ihren Möglichkeiten zur Steuerung eingegangen werden. Es handelt sich dabei um die Programmmodule: *extrLines*, *smsplLines*, *assessLines*, *fuseLines*, *splitLines* und *shortestPaths*, die auch in dieser Reihenfolge ablaufen. Zudem handelt es sich bei den in den Tabellen dargestellten Parametern um jene,



welche auch vom BKG genutzt werden und sich seitdem durch einer Vielzahl von Tests rechtfertigten.

In der ersten Komponente *extrLines* der Software wird in erster Linie die Steuerung der Visualisierung, der Maskierung und der Variablen des Straßenmodells festgelegt. Hier kommen die Erfahrungen aus der Modellierung der Straße (vgl. Kapitel 2) zum Tragen. Die Komponente *extrLines* ist kontextabhängig.

extrLines			
PARAMETER	WERT	EINHEIT	BEMERKUNG
LINE_WIDTH	4.0	Meter	Breite der zu extrahierenden Linie
CONTRAST_HIGH	40	Grauwert	oberer Hystereseschwellwert, Grauwertdifferenz zwischen Startpunkt der Linienpixelkette und der Umgebung
CONTRAST_LOW	5	Grauwert	unterer Hystereseschwellwert, Grauwertdifferenz zwischen einzelnen Linienpixeln
LINE_BRIGHTNESS	light	light/dark	Steuerung der Extraktion heller oder dunkler Straßen
EXTRAKT_WIDTH	True	true/false	steuert die Bestimmung der Linienbreite
CORRECT_POSITION	True	true/false	steuert die Korrektur der Linie bei Verschiebung durch unterschiedlichen Kontrast
COMPLETE_JUNCTIONS	True	true/false	steuert das Finden von nicht extrahierten Kreuzungspunkten
THRESHOLD	0	Grauwert	optional, Schwellwert für die Ausmaskierung
EXTRACT_INSIDE_MASK	True	true/false	steuert, ob die Extraktion innerhalb oder außerhalb der Kontextmaske statt findet

Tabelle 1: extrLines

In dieser zweiten Komponente, *smsplLines*, werden die aus der Extraktion kommenden Linien geglättet und aufgebrochen, sofern die Krümmung der Linie einen Grenzwert überschreiten. Diese Grenzwerte ergeben sich aus den in der Modellierung (vgl. Kapitel 2) festgelegten Eigenschaften, nach denen Straßen z.B. eine bestimmte Krümmung besitzen. Das ist kontextunabhängig, da es einzig um die Eigenschaften als Linie geht.



smsplLines			
PARAMETER	WERT	EINHEIT	BEMERKUNG
SMOOTH_LENGTH	5	Pixel	Länge der Regressionsgeraden
MAX_CURVATURE	0.1	Gradient	Schwellwert der Krümmung zum Aufbrechen einer Linie

Tabelle 2: smsplLines

Die Funktion *assessLines* führt anhand vom Operateur festgelegter Parameter ein Maß der Qualitätsbewertung ein. Da es sich aber um die Bewertung der Linie handelt, ist ein Bezug zur Kontextregion nicht gegeben.

assessLines			
PARAMETER	WERT	EINHEIT	BEMERKUNG
LENGTH	0 50	Meter	diese 2 Werte geben die minimale und maximale Linienlänge für die Bewertung an
DIRECTION_DEV	0 10	deg	diese 2 Werte geben die minimale und maximale Winkelabweichung für die Bewertung an
WIDTH	2 3 8 14	Meter	diese 4 Werte geben die Bewertung der Linienbreite an, welche eine Funktion beschreibt, die zwischen dem 1. und 2. Wert ansteigt, zwischen Wert 2. und 3. konstant bleibt und zwischen dem 3. und 4. Wert linear abfällt (siehe Abb.1)
WIDTH_DEV	0 5	Meter	diese 2 Werte geben die minimale und maximale Breitenabweichung der gesamte Linie für die Bewertung an
GREY_DEV	0 20	Grauwert	diese 2 Werte geben die minimale und maximale Abweichung vom Mittelwert der Grauwerte an
MAX_RAMER_DISTANCE	-1	Wert	wenn Datenreduktion durch Approximation der Konturen gewünscht wird (-1 ∈ aus)

Tabelle 3: assessLines

Die Operation *fuseLines* legt einzig die Rahmenbedingungen für die Fusionierung verschiedener Datensätze fest, was die Kontextunabhängigkeit dieser Operation erklärt.



fuseLines			
PARAMETER	WERT	EINHEIT	BEMERKUNG
WEIGHT_SCALES_LIGHT	1	Wert	optional, gibt Skalierung für den Kanal vor
WEIGHT_SCALES_DARK	1	Wert	optional, gibt Skalierung für den Kanal vor
WEIGHT_SCALES_SEED	1	Wert	optional, gibt Skalierung für den Kanal vor
BUFFER_WIDTH	8	Meter	optional, gibt die Pufferbreite jeweils rechts und links der Linie an
MAX_DIRECTION_DIFFERENCE	30	deg	gibt die maximale Richtungsabweichung für die Zusammenfassung zweier Linien an

Tabelle 4: fuseLines

Die Komponente *splitLines* ist eine Funktion, die in einem bestimmten Abstand Knotenpunkte erzeugt. Die Grundlage dieser Operation ist am allgemeinen Straßenmodell orientiert. Das bedeutet, dass die Ergebnisse völlig unabhängig von der Umgebung der Straße und somit kontextunabhängig sind.

splitLines			
PARAMETER	WERT	EINHEIT	BEMERKUNG
SPLITTED_JUNCTION_DISTANCE	5	Meter	maximaler Abstand zweier Linien zur Generierung eines Knotenpunktes

Tabelle 5: splitLines

In der letzten Komponente, *shortestPaths*, werden die Verknüpfungen zwischen den Startpunkten erstellt. Dabei wird sich auf die Ergebnisse der fünf vorgeschalteten Prozeduren bezogen. Des Weiteren werden hier die Parameter zur Lückenschließung festgelegt, die auf Grund ihrer tragenden Funktion kurz erläutert werden. Die Grenzwerte der Verknüpfung legen im wesentlichen die Parameter `ABS_DISTANCE` und `REL_DISTANCE` fest. Dabei regelt der Parameter `ABS_DISTANCE` den Grenzwert in der Länge einer Lücke, bei dessen Unterschreitung die Kollinearität bei der Verknüpfung ignoriert wird. Zum anderen ist darin die maximale Länge einer Lücke festgelegt, die im Zuge der Verknüpfung geschlossen werden kann. Das bedeutet im Bezug zu den in Tabelle 6 dargestellten Werten, dass bei Lücken kleiner 2 m der Winkel beim Verbinden unbeachtet bleibt und das die Maximallänge einer Lücke 80 m betragen darf, damit diese geschlossen wird. In dem Parameter



REL_DISTANCE ist das Verhältnis von der Lücke zum kürzesten Linienstück der Verknüpfung festgelegt. An den in Tabelle 6 dargestellten Parametern erläutert bedeutet dies, dass die Lücke in ihrer Länge nicht das Vierfache des kürzesten anschließenden Linienstücks überschreiten darf.

shortestPaths			
PARAMETER	WERT	EINHEIT	BEMERKUNG
RESOLUTION	1.0	Wert	Auflösung
WEIGHT	0 1	Wert	Anpassung der Bewertung auf oberen und unteren Wert
ABS_DISTANCE	2 80	Meter	absoluter minimaler und maximaler Abstand von Linienanfangs- und Endpunkt, zwischen denen ohne Beachtung der Kollinearität verknüpft wird
REL_DISTANCE	1 4	Wert	Verhältnis zwischen Verknüpfung und Kantenlänge der kürzesten Linie
COLLINEAR	0 35	deg.	beschreibt die Kollinearitätstoleranz der Linen
JUNCTION	55 90	deg.	Maximalwinkel bei Straßenkreuzungen
MAX_DIST_JUNCTION	5	Meter	maximaler Abstand, der bei orthogonal einmündenden Straßen überbrückt wird
SCALE_LENGTH	true	true/false	Abstandsskalierung
WEIGHT_SEEDPOINT	1.0	Wert	minimale Bewertung einer Linie, um Startknoten zu sein
MIN_DISTANCE	0	Meter	minimale Länge der neu entstehenden Gesamtlinie

Tabelle 6: shortestPaths

Nach Betrachtung aller Parameter zeigt sich erneut die bereits unter Kapitel 3.1.1 beschriebene Kontextabhängigkeit der gesamten Verifikation. Wenn man das Beispiel aus dem Kapitel 3.1.1, den Vergleich zwischen offener Landschaft und dem städtischen Bereich, noch einmal aufgreift und anhand der Steuerparameter durchführt, stellt sich heraus, dass diese in mehreren Parametern abweichen. Aus dem Grund müssen die Extraktionsergebnisse im Zuge dieser Arbeit kontextspezifisch unterschieden werden. Das bedeutet, dass sich bei den Betrachtungen einzig für die Kontextregion *agrar* entschieden wurde, da die Region auf Grund ihrer Beschaffenheit für Extraktionen am geeignetsten ist.



Somit ist der zweite Teil der Verifikation abgeschlossen, der sich dadurch auszeichnet, dass er Vorwissen in Form von Geometrie und Attributen nutzt.

Der Zweck des dritten Moduls ist ausschließlich die Bewertung anhand der Referenzdaten. Die Eingangsdaten des dritten Moduls sind also die Resultate des zweiten Moduls, die sich nach Durchlaufen aller Routinen ergeben. Ziel ist es, das Ergebnis der Verifikation festzulegen, indem es eine Unterteilung der extrahierten Linien in *akzeptiert* und *verworfen* trifft. Damit ein Objekt im Weiteren als *akzeptiert* eingestuft wird, muss es dem geometrischen Bewertungskriterium entsprechen. Dabei wird durch Überlagerung des jeweiligen Extraktionsergebnisses mit seinem zugehörigen ATKIS-Objekt die prozentuale Überdeckung der beiden überprüft. Dadurch wird die Vollständigkeit kontrolliert, die mindestens 95% betragen muss, um *akzeptiert* zu werden. Die Korrektheit einer Linie ist zudem bereits durch die Größe des Buffers festgelegt. Alle Objekte, die diesen Ansprüchen nicht gerecht werden, werden als Ergebnis der Verifikation *verworfen*.

Ziel dieser Methode der Ergebnisbewertung ist eine qualitativ hochwertige Verifikation. Das bedeutet, dass diese streng dem Grundsatz: „Qualität statt Quantität“ entspricht.



4. Erzeugung der Kanäle zur Straßenverifikation im offenen Gelände

Da alle Rahmenbedingungen bzw. die Grundlagen in Bezug auf die Straßenextraktion und deren Software geklärt sind, geht es folgend darum, die Kanäle und die Untersuchungsstrategie näher zu beleuchten. Das Standardprodukt der Landesvermessungsämter ist das Orthophoto, welches in der Regel flächendeckend, aktuell und in der Form eines Dreikanal-Buntbildes vorliegt. Dies bildet auch die Grundlage für die Vorverarbeitung in Form einer Kanaltrennung und die Erzeugung künstlicher Kanäle, welche im folgenden Kapitel erläutert werden soll. Des Weiteren gibt es landesspezifische Unterschiede in der Verarbeitung bzw. Herstellung der Dreikanalbilder. Dafür werden exemplarisch die Daten der hessischen und nordrhein-westfälischen Landesvermessung ausgewählt, die auch im folgenden Kapitel näher betrachtet werden. Abschließend wird die Untersuchungsstrategie in Form der Methodik und des Vorgehens geschildert, die den Kern der Arbeit bilden soll.

4.1 Das verwendete Bildmaterial

Für die Untersuchungen, die im Weiteren durchgeführt werden, bildet Bildmaterial in Form von Orthophotos die Grundlage. Dieses Bildmaterial wurde zum einen von der Landesvermessung Nordrhein-Westfalen und zum anderen von der Landesvermessung Hessen zur Verfügung gestellt. Die Bilder weisen geringfügige Unterschiede auf, die herstellungsbedingt sind. Es unterscheiden sich die Aufnahmetechnik, die Materialien und vieles mehr. Das genauer zu beleuchten und zu analysieren ist das Ziel des folgenden Kapitels.

4.1.1 Die Orthophotos der Landesvermessung Nordrhein-Westfalen

Allgemein ist zu den Orthophotos des Landes Nordrhein-Westfalen zu sagen, dass sie regelmäßig im Turnus von fünf Jahren erneuert werden. In schwarz/



weiß liegt Bildmaterial flächendeckend für das gesamte Land vor. Als Farbbild ist bis Ende des Jahres 2003 mit einem flächendeckenden Angebot zu rechnen.

Es handelte sich bei dem von der Landesvermessung Nordrhein-Westfalen zur Verfügung gestellten Bildmaterial um zwölf Bilder, welche aus einem Flugstreifen stammten. Der Bildflug fand am 17.06.2000 im Bereich 3712 Ibbenbüren im Land Nordrhein-Westfalen statt. Vertreten waren auf den Bildern die Kontextregionen Agrar, Wald und Siedlung. Da sich im Zuge dieser Arbeit, wie in den Kapiteln 2 und 3 bereits erläutert wurde, bei der Betrachtung einzig auf die Kontextregion offene Landschaft beschränkt wird, eignen sich sechs der zwölf Bilder für die Untersuchungen, da diese vorrangig agrarökonomisch genutzte Flächen darstellen.

Im Schriftverkehr mit der Landesvermessung Nordrhein-Westfalen ließen sich die Eckdaten der Herstellung der Orthophotos klären.

Die Luftbilder wurden mit einer klassischen Reihemesskammer mit einer flughöhenbedingten Brennweite von 15 oder 30 Zentimeter aufgenommen. Das Bildformat beträgt 23x23 cm bei einer Bildmaßstabszahl von ca. 1:12.500. Leider ließ sich nicht mehr genau bestimmen, mit welchem Filmmaterial die Aufnahmen durchgeführt wurden. In der Regel wird bei den Befliegungen mit einem Farbnegativfilm gearbeitet. Bei einigen älteren Aufnahmen wurden teilweise auch Farbumkehrfilme genutzt. Auf Grund des Herstellungsdatums der Bilder erscheint letzteres allerdings unwahrscheinlich.

Die analog-digital Wandlung des Bildmaterials wurde mit einem Scanner des Typs Leica/ Helava DSW200 oder DSW600 getätigt. Dabei wurde mit einer geometrischen Auflösung von ca. 0,025 mm/ Bildpunkt gearbeitet. Die beiden Scanner haben eine typbedingte radiometrische Auflösung von 10 Bit des DWS200 bis 12 Bit des DWS600. Diese wurde auf ein gängiges Format von 8 Bit reduziert.

Die geometrische Orthoentzerrung wurde im orientierten Luftbild unter Einbeziehung eines DGM standardmäßig durchgeführt.

Bei der radiometrischen Optimierung wurde eine globale Tonwertkorrektur mittels Dodging erreicht. Folgend wurde die globale und lokale Farbbalance interaktiv mittels Photoshop realisiert. Im Anschluss kam es vereinzelt zu Retuscharbeiten. Diese radiometrischen Optimierungen sind stark vom Operateur abhängig, da sie nicht durch Normen, sondern nach „Gefühl“



verrichtet werden. Dadurch können die Ergebnisse bildweise variieren und nur sehr schlecht bzw. gar nicht nachvollzogen werden.

Das Produkt der eben beschriebenen Arbeiten ist ein digitales Orthophoto (DOP5), welches eine Fläche von 2.000 x 2.000 m umfasst. Dies hat eine Bodenauflösung von 0,3125 m und eine geometrische Lagegenauigkeit von ca. ± 1 m. Die radiometrische Auflösung beträgt insgesamt 24 Bit im 3-Kanal-RGB-Bild. Demnach stehen 8 Bit pro Kanal zur Verfügung, die im TIFF Format mit einer dazugehörigen Info-Datei im sogenannten tfw-Format (**tiff-world-file**) ausgeliefert werden und die Parameter der Orientierung beinhalten.

Im einzelnen wurden die Bilder geringfügig nachbearbeitet, um eine Verifikation durch die Software Quala zu gewährleisten. Es wurde die Grundpixelauflösung gesenkt, welche im Ausgangsbild 0,3125 m/ Pixel beträgt. Dies wurde durch Umrechnung in die zweite Pyramidenebene, im Weiteren auch P2-Ebene genannt, erreicht. Dabei wurde die Auflösung künstlich um das Vierfache verschlechtert. Erzielt wurde das, indem man die Grauwerte von vier benachbarten Pixeln mittels einer bilinearen Interpolation mittelt und einem neuen Pixel mit der vierfachen Größe zuwies. Folgend haben die Orthophotos eine Grundpixelgröße von 1,25 m. Dieser Schritt war nötig, da die Software Quala, wie in Kapitel 2 erläutert, in ihrer Betrachtung von linienhaften und nicht von flächenhaften Objekten als Straßen ausgeht.

4.1.2 Die Orthophotos der Landesvermessung Hessen

Im Land Hessen unterliegt das Orthophotomaterial ebenfalls einem Erneuerungszyklus von 5 Jahren und ist flächendeckend in schwarz/ weiß vorhanden.

Bei dem zur Verfügung gestelltem Material handelt es sich um fünf Orthophotos, welche jede Kontextregion beinhalteten. Für die Untersuchungen eigneten sich jedoch nur drei der Luftbilder, da nur in diesen die Kontextregion agrar zur Genüge vertreten war. Das Bildmaterial stammt in diesem Fall nicht aus einem Flugstreifen. Auch die Aufnahmedaten sind nicht identisch. Zwei der Bilder wurden am 17.06.2002 aufgenommen und das dritte stammt aus einem Bildflug des 10.10.2002. Das stellt jedoch kein Problem dar.



Die Verfahrensweise bei der Herstellung der Orthophotos durch das hessische Landesvermessungsamt konnte ebenfalls im Schriftverkehr geklärt werden. Dazu ist zu sagen, dass diese der Verarbeitung, wie sie in Nordrhein-Westfalen durchgeführt wurde, sehr ähnelt. Aus dem Grund wird in der Erläuterung in erster Linie auf die Unterschiede eingegangen.

Die Luftbildaufnahme erfolgte analog der nordrhein-westfälischen, jedoch mit dem Unterschied, dass die Bildmaßstabszahl 1:13.000 betrug und die Verwendung eines Farbnegativfilmes bestätigt wurde.

Die analog-digital-Wandlung wurde mit dem Scanner Leica/ Helava DSW 500 durchgeführt, der eine geometrische Auflösung von 0,0125 mm/ Bildpunkt besitzt. Die radiometrische Auflösung beträgt 12 Bit .

Die geometrische Entzerrung wurde analog der in Kapitel 4.1.1 beschriebenen Entzerrung mittels eines DGM im orientierten Luftbild durchgeführt.

Die radiometrische Optimierung verlief ebenfalls analog.

Das Produkt des Orthophotos weist die gleichen Eckdaten, wie sein nordrhein-westfälisches Pendant auf. Der einzige Unterschied ist, dass das hessische Landesvermessungsamt lediglich eine Bodenauflösung von 0,4 m garantiert.

Damit gibt es bezüglich der Eingangsdaten keine nennenswerten Unterschiede, die eine getrennte Betrachtung rechtfertigen würden. Die Orthophotos sind demnach als gleichwertig anzusehen.

Die zur Erzeugung der P2-Ebene notwendige Nachbearbeitung wurde übereinstimmend mit der Verfahrensweise in Kapitel 4.1.1 durchgeführt. Das Resultat unterschied sich jedoch durch die geringfügige Änderung der Bodenauflösung im hessischen Datensatz. Die Grundpixelgröße der hessischen P2-Ebene beträgt demnach 1,6 m, was jedoch unerheblich für die Verifikationssoftware bzw. deren Ergebnis ist.



4.2 Die Betrachtung der Kanäle

Heutzutage stellen Befliegungen eines der gängigsten Mittel der Landesvermessung dar. Als Ergebnis dieser Befliegungen entsteht durch Berechnung das Orthophoto, welches multispektral, also in den Kanälen Rot (R), Grün (G) und Blau (B) geliefert wird, dessen Herstellung gerade erläutert wurde. Im folgenden Kapitel soll beschrieben werden, wie die sieben Kanäle, mit denen im Weiteren gearbeitet wird, getrennt und teilweise auch erst erzeugt werden.

4.2.1 Die RGB Farbtrennung

Da die drei Primärfarben Rot, Grün und Blau in einem Bild in drei getrennten Layern vorliegen, die gleichzeitig dargestellt werden, ist die Trennung einfach zu realisieren. Dazu müssen einzelne Bilder für jeden Kanal erzeugt werden, in denen man die Farbinformationen des jeweiligen Layers durch Grauwerte ersetzt. Da es sich sowohl bei dem Ausgangsmaterial als auch bei dem Ergebnis um Bilder mit einer radiometrischen Auflösung von 8 Bit handelt, ist dies nicht mit Grauwertinterpolationen oder ähnlichem verbunden. Die Umformung eines multispektralen Orthophotos in drei getrennte s/w (schwarz/weiß) Orthophotos wurde mit der Software ERDAS-imagine 8.5 der Firma Applied Analysis Inc. (AAI) durchgeführt. Bei der Operation handelt es sich um eine Standardroutine des Softwarepaketes. Da die Orthophotos der Landesvermessungen ein hochwertiges Produkt darstellen, ist eine Nachbearbeitung z.B. durch Kontraststreckungen o.ä. in der Regel nicht nötig.

Wesentlich schwieriger gestaltet sich die Erzeugung der weiteren vier Kanäle. Dabei handelt es sich zum einen um die Kanäle der IHS Darstellung und zum anderen um den Kanal der ersten Hauptachse. Deren Berechnung und der inhaltliche Ablauf der Operationen wird im folgenden erklärt.



4.2.2 Die IHS Transformation

Der Intensitätskanal (I), der Kanal des Farbtons (Hu) und der Sättigungskanal (S) stellen die im Weiteren zu bearbeitenden Kanäle dar. Diese basieren auf einem anderen farbmetrischen System, dem IHS Farbraum (Intensity, Hue, Saturation). Dies lässt sich anschaulich erklären: Die Intensität (I) oder auch „Helligkeit“ bestimmt, ob ein Bildpunkt hell oder dunkel dargestellt wird. I regelt also den schwarzen und weißen Anteil in einem Bild, wohingegen der Farbton (Hu) das farbunterscheidende Merkmal ist. Er bezeichnet die grundsätzliche Farbe, das heisst, ob sich ein Pixel z.B. Grün, Blau oder Gelb darstellt, was als Winkel, beginnend mit Rot bei 0° angegeben wird. Die Sättigung (S) oder auch „Buntheit“ stellt das Verhältnis der Reinheit einer Farbe dar. Das bedeutet an einem Beispiel erläutert, dass eine Gelbabstufung in Richtung Blau von geringer Reinheit ist. Bei $I = S = 100\%$ befindet sich das Sechseck der reinsten Farbe. Abbildung 3 stellt das System anschaulich dar:

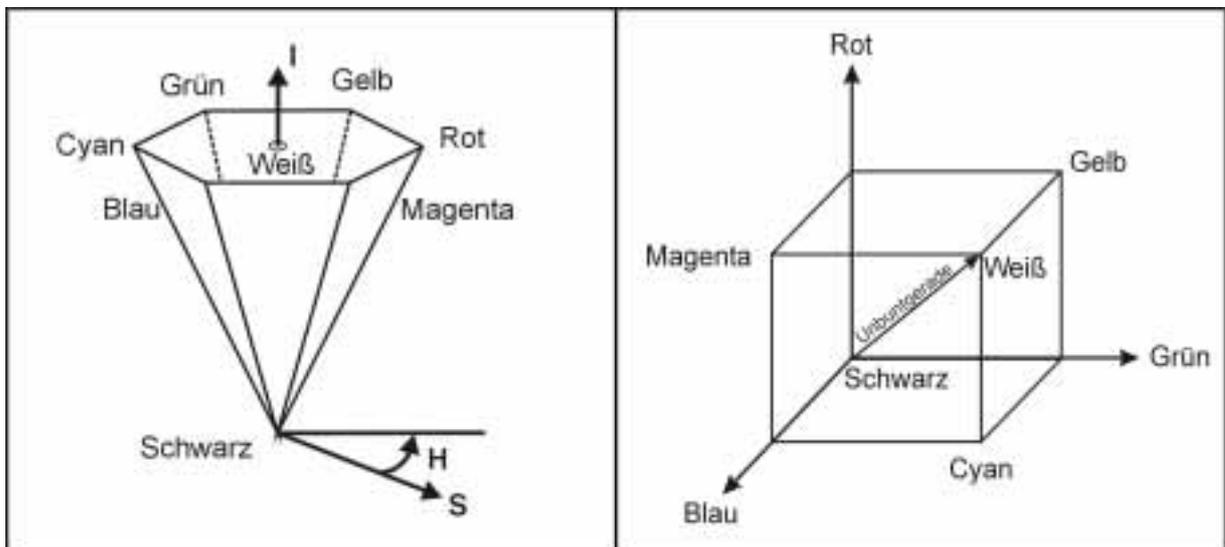


Abbildung 3: IHS Farbraum (links), RGB Farbraum (rechts)⁶

Dabei ist auch der RGB Farbwürfel abgebildet, der die Grundlage bildet. Zur Erzeugung der gewünschten Kanäle gilt es an dieser Stelle, das RGB Ausgangsbild in den IHS Farbraum zu transformieren. Um dies durchzuführen, muss in einem ersten Schritt die Raumdiagonale des RGB

⁶ aus [HAKE ET AL., 2002]



Farbkoordinatensystems so gedreht werden, dass sie mit der Rotationsachse des IHS Farbzylinders zusammenfällt, da der IHS Farbraum geometrisch als die Projektion des RGB Einheitswürfels entlang der Unbuntgeraden (schwarz/weiß) zu sehen ist. Auf der Rotationsachse wird jetzt die Intensität I_1 abgetragen. Die beiden resultierenden Achsen werden im Weiteren mit M_1 und M_2 bezeichnet. Durch die folgende Gleichung wird die gerade erläuterte Drehung beschrieben:

$$\begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{\sqrt{6}} & \frac{-1}{\sqrt{6}} & \frac{-1}{\sqrt{6}} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{-1}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (4.1.)^7$$

Hiernach werden die kartesischen Koordinaten M_1 , M_2 und I_1 in die Zylinderkoordinaten I , H und S durch die Gleichungen 4.2. bis 4.4. umgewandelt.

$$I = I_1 * \sqrt{3} \quad (4.2.)^7$$

$$H = \arctan\left(\frac{M_1}{M_2}\right) \quad (4.3.)^7$$

$$S = \sqrt{M_1^2 * M_2^2} \quad (4.4.)^7$$

Nun ist die Transformation der beiden Farbsysteme im mathematischen Sinne abgeschlossen. Das Ergebnis ist jeweils ein Graustufenbild, welches die Intensitäten, den Farbton und die Sättigung darstellt und den Analysen der Straßenverifikation zur Verfügung steht. Durchgeführt wurde die Transformation erneut mit einem Modul der Software ERDAS-Imagine 8.5 der Firma Applied Analysis Inc. (AAI), welches eine Standardoperation darstellt.

⁷ aus [LILLESAND UND KIEFER, 1994]



4.2.3 Die Hauptachsentransformation

Da das aus drei Kanälen bestehende Bild mit einem Sensor aufgenommen wurde, sind Korrelationen, also Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Kanälen, nicht zu vermeiden. Folglich überlappt sich der Informationsgehalt der verschiedenen Kanäle signifikant, wodurch z.B. bei einigen Klassifizierungen Probleme auftreten können. Aus dem Grund hat man nach einer Darstellungsmöglichkeit gesucht, die keine redundanten Informationen enthält. Diese zeigt sich im Merkmalsraum, in dem die Grauwerte als Merkmalsvektoren dargestellt sind und die Achsen die jeweiligen Kanäle definieren. Eine redundanzfreie Darstellung wird erreicht, in dem im Merkmalsraum die Achsen des Koordinatensystems in die Richtung der stärksten Streuung gedreht werden. Abbildung 4 stellt das dar. Dabei zeigt die erste Achse in Richtung der Hauptkomponenten. Diese beinhaltet durch die maximale Streuung der Grauwerte auch automatisch den höchsten Informationsgehalt. Die weiteren Achsen resultieren aus der Lage der ersten Hauptachse, sind allerdings auf Grund ihres geringen Informationsgehaltes für die meisten Anwendungen irrelevant. Deshalb werden sie auch im folgenden nicht betrachtet.

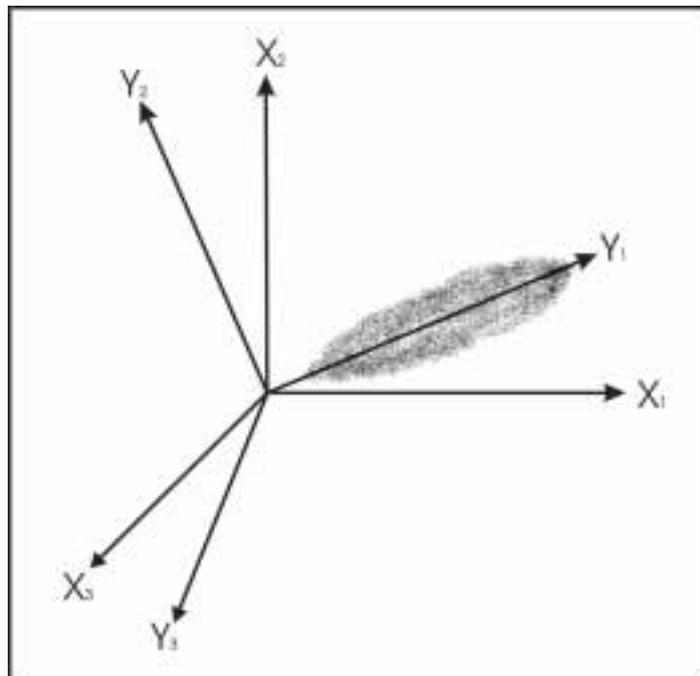


Abbildung 4: Transformation dreier korrelierter Kanäle in die Hauptkomponenten⁸

⁸ nach [RICHARDS UND JIA, 1999]



Die eben erwähnte Drehung wird erreicht, in dem die bildbeschreibende Matrix B durch die Transformationsmatrix A in die Bildmatrix B_H' der Hauptkomponente umgerechnet wird.

$$\underline{B}_H' = \underline{A}^T * \underline{B} \quad (4.5.)^9$$

Dabei wird die Transformationsmatrix A so bestimmt, dass die Kovarianzmatrix C_H' des transformierten Bildes auf der Diagonalen die Eigenwerte λ der Kovarianzmatrix C des Ursprungsbildes hat.

$$\underline{C}_H' = f(\underline{C}) \quad (4.6.)^9$$

Durch die Spektralzerlegung ergibt sich die Gleichung

$$\underline{C}_H' = \underline{A}^T * \underline{C} * \underline{A} \quad (4.7.)^9$$

bei der die Anforderung erfüllt ist. Die Eigenwerte ergeben sich aus der charakteristischen Gleichung, mit I als Einheitsmatrix.

$$\det(\underline{C} - \lambda * \underline{I}) = 0 \quad (4.8.)^9$$

Damit kann dazu übergegangen werden, in dem nächsten Schritt die Eigenvektoren x der Transformationsmatrix A zu berechnen.

$$(\underline{C} - \lambda * \underline{I})x = 0 \quad (4.9.)^9$$

Nun wird die Kovarianzmatrix C_H' nach abnehmenden Varianzen geordnet, damit sich in der Transformationsmatrix A auch eine nach der Größe geordnete

⁹ aus [LILLESAND UND KIEFER, 1994]



Reihenfolge der Eigenvektoren ergibt. Mit der geordneten Transformationsmatrix A lassen sich nach der Eingangsformel (4.5.) die Kanäle der Hauptachse berechnen. Dies wurde analog zu Kapitel 4.2.1 mit einer Prozedur des Programmpaketes ERDAS-Imagine 8.5 durchgeführt, wie auch die anschließende Isolation des Kanals der ersten Hauptachse, der dann im Weiteren als eigenständiges Graustufenbild getrennt wurde.

4.3 Die Strategie der Untersuchungen

Im folgenden geht es darum, das erklärte Ziel der Arbeit durch eine plausible Untersuchungsstrategie zu verwirklichen. Dazu muss in einem ersten Schritt die Zielstellung eingehend erläutert werden.

Der Kern der Arbeit ist die Analyse von Fernerkundungsdaten, die wie eben beschrieben (vgl. Kapitel 4.2) aufgespaltet wurden in einen Rot-, Grün- und Blaukanal. Des Weiteren wurde sowohl der Intensitätskanal, der Kanal des Farbtons, der Sättigungskanal, als auch die erste Hauptkomponente erzeugt (vgl. Kapitel 4.2). Damit stehen den Untersuchungen sieben Kanäle zur Verfügung. Im Verlauf der Arbeit ist zu klären, welcher Kanal bei einem festgesetzten Parametersatz die besten Extraktionsergebnisse im Bereich der offenen Landschaft liefert, wobei auch die jeweiligen Vor- und Nachteile abzuwägen sind. *PROZEDUR A* gibt darüber Aufschluss. Dabei soll auch die Übertragbarkeit auf andere Datensätze gewahrt bleiben. Dies erreicht man dadurch, dass die Orthophotos, mit denen gearbeitet wird, aus verschiedenen Quellen stammen. Das bedeutet, dass das Bildmaterial zum einen aus Nordrhein-Westfalen und zum anderen aus Hessen bezogen wird. Folglich ist das Ergebnis aussagekräftiger und sicherer gegenüber zufälligen Anomalien oder ähnlichem, wodurch das Resultat verfälscht werden könnte.

In einem zweiten Teil der Arbeit soll untersucht werden, mit welchem Parametersatz ein jeweiliger Kanal sein Extraktionsmaximum erreicht. Unter diesen Vorgaben ist eine Strategie anzuwenden, welche die Ziele sichert. Folgend wird das Vorgehen als *PROZEDUR B* bezeichnet.

Um Aussagen bezüglich der Fragestellung treffen zu können, muss als erste Voraussetzung die Richtigkeit der zu verifizierenden Daten gegeben sein. Im einzelnen bedeutet dies, dass die Straßen, die aus dem ATKIS-Datensatz exportiert werden, auch richtig sein müssen in Bezug auf Lage und Parameter,



wie Breite oder Klassifizierung. Es dürfen auch nur extrahierbare Straßen vorhanden sein, um aussagefähige Ergebnisse zu erzielen. Zur Gewährleistung dessen, sollte der ATKIS-Datensatz kontrolliert und berichtigt werden. Die Kontrolle erfolgte in dem Programm ArcEdit. Im Verlauf erwies es sich als praktikabler, den kompletten Satz neu und von Hand zu erstellen. Das Vorgehen begründet sich durch die Vielzahl sowohl nicht extrahierbarer als auch geometrisch inkorrektur Daten. Damit kann im folgenden generell von richtigen Eingangsdaten ausgegangen werden. Als zweites musste ein Referenzmodell erstellt werden, welches aus hundertprozentig inkorrekten Daten bestehen soll. Erreicht wurde dies durch die Erzeugung eines komplett falschen Eingangsdatensatzes. Der bestehende richtige Datensatz wurde dafür um einhundert Grad gedreht, um dennoch vergleichbare Bedingungen zu erhalten, was die Verteilung, die Straßenlängen und Straßenbreiten anging. Da Baumreihen, welche sich neben Straßen befinden und somit noch in Bufferreichweite sind, laut [GERKE ET AL., 2003] als Hauptfehlerquelle für die Verifikation von Straßen im offenen Gelände gelten, wurde ein dritter Datensatz erstellt. In diesem wurden ausnahmslos Baumreihen digitalisiert, welche in ihrer Struktur Straßen ähneln. Damit ist es möglich, im Zuge der Untersuchungen auch Aussagen bezüglich eventueller Fehlextraktionen zu treffen.

4.3.1 Die Prozedur A

Da die Rahmenbedingungen, Eingangsdaten und Ziele anfangs geklärt wurden, geht es daran, das Vorgehen genauer zu erläutern. Als erstes ist zu untersuchen, welcher Kanal mit einem bestehenden festgesetzten Parametersatz das beste Ergebnis erzielt. Das wird im weiteren Verlauf Prozedur A genannt. Bei dem eben erwähnten Parametersatz handelt es sich um die Parameter, welche auch von dem BKG genutzt werden und sich bisher in der Praxis bewährten. Aus dem Grund werden die Parameter im folgenden als gegeben angesehen. Dabei handelt es sich um die Parameter, welche im Anhang A.1 und im Kapitel 3 in Tabelle 1 bis 6 dargestellt und erläutert sind. Um des Weiteren Aussagen bezüglich der Kanäle treffen zu können, müssen Tests durchgeführt werden. Am aussagekräftigsten ist dies, wenn „positiv“ und „negativ“ getestet wird. Im „positiv“-Test wird in den einzelnen Testbildern die Straßenextraktion mit der Software Quala durchgeführt. Da die Eingangsdaten kontrolliert wurden, sind alle Straßen verifizierbar, wodurch eine direkte Vergleichbarkeit der Bilder gegeben ist. Werden unter den Bedingungen große Teile des Straßennetzes verifiziert, eignet sich der Kanal offensichtlich gut zur



Extraktion. Ob dem wirklich so ist, wird im „negativ“-Test, der sogenannten Sensitivitätsanalyse, überprüft. Deren Zweck ist es, den Einfluss der Extraktionsfehler zu erkennen und deren Folgen zu minimieren. Dabei findet der Programmdurchlauf mit den falschen Eingangsdaten statt. Sollte dennoch etwas verifiziert werden, ist das Ergebnis falsch. In Einzelfällen kann es durch ungünstige Lage des Bufferfensters dennoch zu Extraktionen kommen. Vorstellbar ist dies, wenn das Fenster auf Baumreihen, Ackerfurchen oder allgemein auf linienhafte Strukturen fällt. Diese sind allerdings von der Bewertung auszuschließen. Des Weiteren stellen laut [GERKE ET AL., 2003] besonders Baumreihen, die sich in unmittelbarer Nähe einer Straße befinden, ein ernstzunehmendes Problem dar. Der Verifikationsalgorithmus sucht nach linearen Strukturen, welche auch von Baumreihen dargestellt werden. Dadurch werden diese teilweise als Straßen extrahiert. Das ist unerwünscht, da dann keine sicheren Aussagen über die Straßen getroffen werden kann oder deren Verlauf nachhaltig verändert wird. Um speziell auf den Fall der Baumreihen einzugehen, wird auch eine Verifikation mit einem Datensatz vorgenommen, der ausnahmslos aus diesen besteht. Damit soll geklärt werden, wie anfällig einzelne Kanäle für solche Fehlerquellen sind.

Um die Ergebnisse, die in der Verifikation kanalweise erzielt wurden, auch begründen zu können, folgen Untersuchungen der spektralen Eigenschaften der Bilder. Dazu werden Grauwertprofile genutzt, welche zum einen quer zum Verlauf der Straße und zum anderen in Richtung der Straße gelegt werden. Diese Verfahrensweise soll die kanalweisen Unterschiede offen legen. Dabei interessiert speziell der Kontrast, die Abgrenzung der Straße und die Einheitlichkeit im Verlauf. Das sind Eigenschaften mit direktem Einfluss auf das Verifikationsergebnis. Des Weiteren werden diese Untersuchungen auch in Prozedur B benötigt, da mit dem Wissen um die kanalspezifischen Unterschiede auch die Parameter zur Steuerung positiv beeinflusst werden können.

Abschließend wird analysiert, ob systematische Zusammenhänge der Kanäle im Verifikationsergebnis zu erkennen sind.

4.3.2 Die Prozedur B

In Prozedur B liegt der Schwerpunkt der Untersuchung in der Bestimmung kanalspezifischer Parameter zur Steuerung der Verifikation. Dabei geht es



darum, auf die kanalspezifischen Unterschiede gezielt einzugehen. Der reine Ablauf der Untersuchung gestaltet sich jedoch ähnlich wie eingangs in Prozedur A beschrieben. Es wird sowohl positiv als auch negativ getestet, zum Ausschluss von Fehlern oder zu „weicher“, alles extrahierender Parameter durchgeführt. Bei der Bestimmung der Steuerparameter stützt man sich auf die Ergebnisse der Grauwertuntersuchungen der Prozedur A, wie bereits in Kapitel 4.3.1 beschrieben. Mit diesem Wissen gilt es nun, in Versuchen gezielt einzelne Parameter zu verändern. Folgend werden die veränderten Parameter mit positivem Einfluss kombiniert, was zu einer Verbesserung der Resultate führen sollte. Das wird iterativ, in einer Vielzahl von Programmdurchläufen durchgeführt.



5. Untersuchungen und Ergebnisse im Datensatz Nordrhein-Westfalen

In diesem Kapitel werden die Untersuchungen nach dem Schema der in Kapitel 4 kurz erläuterten Prozedur A und Prozedur B am Datensatz Nordrhein-Westfalen durchgeführt. Es wird hierbei speziell auf die erzielten Ergebnisse der Untersuchungen eingegangen. Der Schwerpunkt liegt dabei in der Bewertung der Kanäle hinsichtlich ihrer Eignung zur Verifikation von Straßen und alternativ in der Suche nach kanalspezifischen Steuerparametern. Des Weiteren werden Baumreihen untersucht, da diese ebenfalls linienhafte Strukturen im Bild darstellen.

5.1 Die Untersuchungen der Prozedur A

In Prozedur A werden die verschiedenen Kanäle und die Auswirkungen der kanalspezifischen Unterschiede auf das Ergebnis der Verifikation untersucht. Diese Untersuchungen spalten sich in vier Abschnitte auf, in denen die Verifikation mehrfach durchgeführt wird. Zum einen mit ausschließlich richtigen Eingangsdaten, um Fehler in der Extraktion aufzudecken, zum anderen mit ausnahmslos falschen Eingangsdaten, um zu weiche Steuerparameter oder systematische Unstimmigkeiten ausschließen zu können und abschließend mit Eingangsdaten in Form von digitalisierten Baumreihen. Zur Begründung der erzielten Ergebnisse wurden die Kanäle im Anschluss mittels Grauwertprofilen untersucht.

5.1.1 Die Verifikation von Straßen mit positiven Eingangsdaten

Im ersten Schritt der Untersuchungen wurde die Verifikation mit dem positiven Eingangsdaten durchgeführt. Der positive Eingangsdatensatz beinhaltet einzig Straßen, die sowohl gut zu erkennen als auch geometrisch korrekt sind. Das ist für die Untersuchungen wie sie durchgeführt wurden unerlässlich, da hier



herauszufinden ist, wie sicher die Ergebnisse der Verifikation sind. Eigens dafür wurden die Straßen in den Testbildern digitalisiert. Bedingung dafür war, dass alle Straßen extrahierbar sind. Dabei wurden durchschnittlich pro Bild sechzig Straßen oder Straßenstücke mit einer Länge von ca. 10,4 km pro Bild digitalisiert. Das bedeutet, dass für die Untersuchungen im Bildmaterial Nordrhein-Westfalen insgesamt dreihundertsechzig Straßenstücke, mit einer Gesamtlänge von 62,25 km, zur Verfügung stehen. Die geringere Kilometerzahl ist mit den hohen Anforderungen an gut verifizierbare Straßen zu begründen, die nur von wenigen erfüllt werden. Erschwerend kam dazu, dass die Aufnahme des Bildmaterials im Sommer stattfand, was eine Verdeckung der Straße durch die Belaubung angrenzender Bäume bedingt.

Ebenfalls müssen, um die eben genannten Kriterien wie Vergleichbarkeit zu bewahren, die Parameter zur Steuerung festgesetzt werden. Bei diesen handelt es sich um die Parameter, wie sie unter anderem vom BKG genutzt werden und sich in der Praxis bewährten. Im Kapitel 3 in den Tabellen 1 bis 6 und in Anhang A.1 sind diese dargestellt. Unter den Bedingungen und Gegebenheiten war es nun möglich, die Verifikation mit dem Programm Quala für jedes der sechs Bilder in jedem der fünf Kanäle durchzuführen. Damit lief die Verifikation ca. vierzig mal nacheinander im Batch ab.



Abbildung 5: Verifikationsergebnis des roten Kanals im Bild 1486 mit akzeptierten (grün) und verworfenen Straßen (rot)



Zur Anschauung ist das Ergebnis der Verifikation im Bild 1486 in Abbildung 5 beispielhaft dargestellt. Es zeigt die Resultate, wie sie im roten Kanal erzielt wurden. Darin stellen sich die digitalisierten Straßen durch die roten und grünen Linien dar. Die Farben repräsentieren dabei das Ergebnis der Verifikation, wobei rot für verworfen und grün für akzeptiert steht. Es ist zu erkennen, dass der Anteil der verworfenen Straßen entsprechend gering ist.

Die Resultate der Verifikation fielen wie erwartet recht unterschiedlich aus. Es wurden Ergebnisse zwischen 78,3% als untere Grenze und 94,8% als Maximum erreicht. Durchschnittlich wurden als Mittel über alle Bilder und Kanäle 89,2% akzeptiert. Von besonderem Interesse sind allerdings die kanalweisen Unterschiede, welche in Abbildung 6 dargestellt sind.

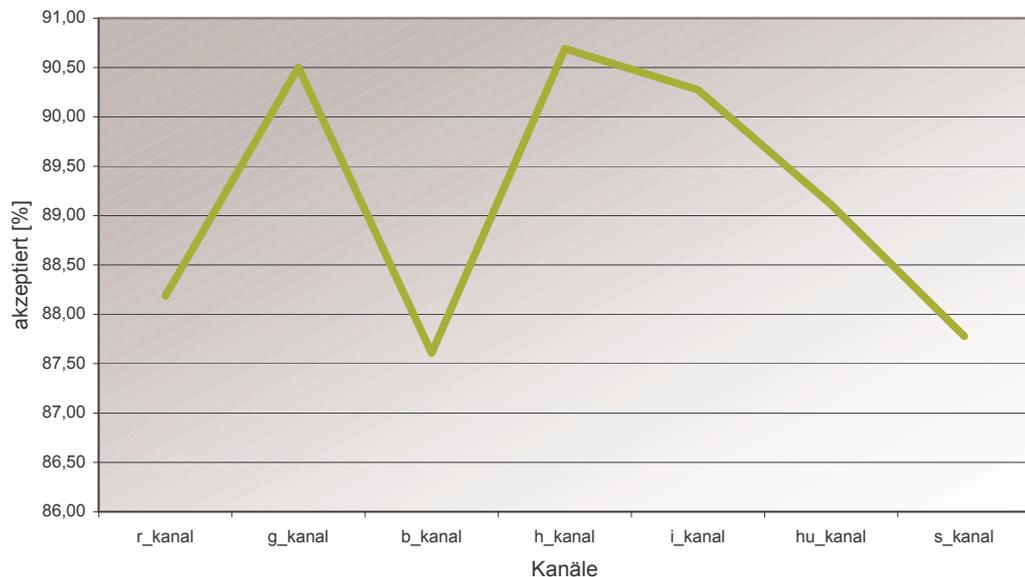


Abbildung 6: Verifikationsergebnis mit positiven Eingangsdaten

Die Graphik 6 lässt deutlich erkennen, dass es kanalspezifische Unterschiede in den Ergebnissen gibt. Es lassen sich die Resultate im wesentlichen in zwei Gruppen teilen, die zwei verschiedene Extraktionsniveaus aufzeigen. In der ersten Gruppe befinden sich demnach die Ergebnisse, die im Kanal der Hauptachse, im grünen Kanal und im Kanal der Intensitäten erzielt wurden. Diese machen mit Akzeptanzen zwischen 90,7% und 90,3%, quasi ohne Differenz untereinander und in der genannten Reihenfolge die Extraktionsspitze aus. Dem folgt zwischen den Fronten das Resultat, welches im Kanal des Farbtons mit der Annahme von 89,1% der getesteten Straßen erreicht wurde. Mit etwa dem gleichen Abstand schließt sich dem die Gruppe der Kanäle mit



den minderen Extraktionsergebnissen an. Diese beinhaltet die Resultate des roten Kanals, des Sättigungskanals und des blauen Kanals, die sich ebenfalls in dieser Reihenfolge abtufen. Dabei wurden Akzeptanzen zwischen 88,2% und 87,3% erreicht. Daraus ergibt sich ein Unterschied der Akzeptanzniveaus der beiden Gruppen von 2,7%, was eine Differenz von ca. zehn Straßen ausmacht, die in der ersten Gruppe mehr extrahiert werden konnten. Damit wurde eine erste Wertung abgegeben, die allerdings noch nicht repräsentativ ist. Um das zu erreichen ist es nötig, folgend die Verifikation mit negativem Eingangsdaten durchzuführen. Einzelne Kanäle sind erst dann als geeignet zu betrachten, wenn in einer Referenzverifikation mit ausschließlich falschen Daten ebenfalls korrekte Ergebnisse erzielt werden. Nur dann ist davon auszugehen, dass die Verifikation im jeweiligen Kanal zuverlässig ist. Die Untersuchungen dahingehend werden in Abschnitt 5.1.2 behandelt.

Von Interesse sind die Gründe, die dazu führen, dass das System vorliegende Straßen nicht akzeptiert. Dazu müssen die verworfenen Straßen genauer analysiert werden. Als erstes ist zu untersuchen, ob eine Verifikation prinzipiell möglich ist. Das wird dadurch sichergestellt, dass nur Straßen betrachtet werden, die in mindestens einem der sieben Kanäle akzeptiert wurden. Das bedeutet im Gegenzug, dass die kanalspezifischen Eigenschaften für die unterschiedlichen Ergebnisse verantwortlich sind.

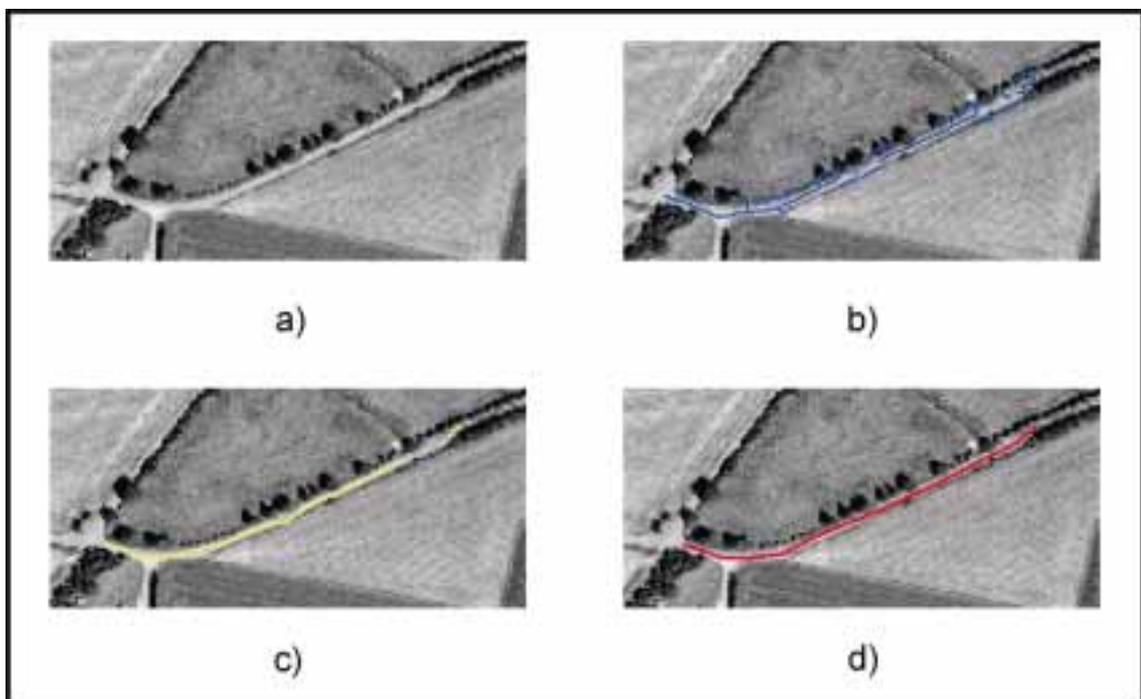


Abbildung 7: Fehlerhafte Verifikation einer Straße: a) Straße im Bild, b) Extraktion, c) Ergebnis der Verknüpfung, d) Bewertung (rot = verworfen)



Die Untersuchung der einzelnen verworfenen Objekten zeigt, dass die kanalspezifischen Differenzen nur in kleinen Teilen der Straße auftreten. Dadurch bilden sich in der Linienextraktion Lücken, die vom System nicht geschlossen werden können, was dazu führt, dass die gesamte Straße verworfen wird. In Abbildung 7 ist dies beispielhaft dargestellt. Weitere Gründe, die das Verwerfen der Straßen bedingen, wurden nicht erkannt.

Nun folgen einzelne Untersuchungen, die das Verifikationsverhalten im einzelnen begründen sollen. Exemplarisch wurden diese Analysen für die Kanäle Rot, Grün, Blau, erste Hauptachse und Intensitäten durchgeführt. Das ist dadurch zu begründen, dass diese Kanäle eine repräsentative Auswahl an Probanden mit sowohl positiven als auch negativen Resultaten in der Verifikation darstellen. Die Auswahl wird ebenfalls bei den anschließenden Analysen der Grauwerte beibehalten.

Während der Verifikation werden von der Software Dateien erzeugt, die statistische Informationen zum Ergebnis beinhalten. Darin enthalten sind unter anderem Daten zu den Wegbreiten. Diese objektweisen Informationen zu den Straßenbreiten können für Analysen zur Qualitätsbeschreibung der Kanäle genutzt werden. Die Zuordnung der Daten erfolgt über die EDDBS ID, welche es ermöglicht, das jeweilige Objekt zu identifizieren. Weiterhin wird Anzahl n der extrahierten Linienstücke aufgeführt, die letztlich zur Straße verbunden wurden. Das ist als Qualitätsmaß nutzbar, da die Verifikation mit fallender Anzahl der zusammengeführten Linienstücke souveräner wird. Eine Verifikation mit wenigen Linienstücken, die allerdings länger sind, ist sicherer, da diese scheinbar zuverlässiger extrahiert werden konnten. Des Weiteren werden die gemittelten und die gewichteten Breiten der Straßen ausgegeben. Das bedeutet, dass die Breite jedes extrahierten Linienstückes gemessen wird und unter Abhängigkeit ihrer Länge ein Gewicht erhält, welches bei der Ermittlung der Gesamtbreite berücksichtigt wird. Der Wert lässt keine Aussagen bezüglich der Qualität des Bildmaterials zu, da die realen Breiten der Straßen nicht bekannt sind. Der nächste Parameter, der ausgegeben wird, ist dahingehend wesentlich aussagefähiger. Dabei handelt es sich um die Standardabweichung der bestimmten Straßenbreite. Je höher die Standardabweichung ist, desto größer ist die Breitenvarianz der einzelnen extrahierten Linienstücke. Straßen besitzen jedoch einen konstanten Verlauf bezüglich ihrer Breite. Aus diesem Grunde lässt sich anhand des Wertes der Breitenvarianz die Qualität eines Kanals untersuchen.

Die erste Analyse untersucht die Anzahl n der extrahierten Linienstücke, aus der innerhalb der Verifikation eine Straße zusammengefügt wird. Dabei ist es



möglich, eine Aussage bezüglich der Qualität eines Kanals zu treffen. Eine geringe Anzahl an extrahierten Linienstücken ist ein Zeichen für eine souveräne Verifikation, da demnach die Linienstücke, die zur Straße verbunden wurden, länger und damit sicherer sind. Zur Analyse wurde die Anzahl gemittelt, um sie kanalweise vergleichen zu können. Graphisch dargestellt ist dies in Abbildung 8.

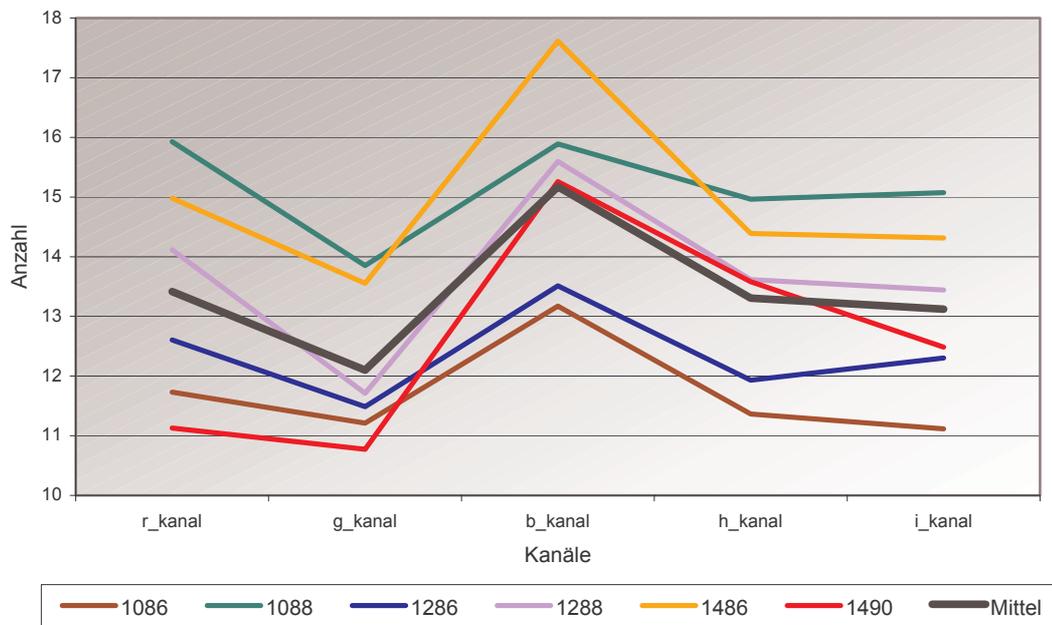


Abbildung 8: Anzahl n der Linienstücke

Im Diagramm 8, welches die Mittelwerte jedes Bildes in jedem Kanal zeigt, ist deutlich ein systematischer Verlauf zu erkennen. Da die Verifikation mit fallender Anzahl an Linienstücken souveräner wird, weist der blaue Kanal mit durchschnittlich 15,2 Linienstücken pro akzeptierter Straße das unsicherste Ergebnis in allen Bildern auf. Damit wird das Verifikationsergebnis bestätigt, in welchem im blauen Kanal ebenfalls das schlechteste Resultat erzielt wurde. Gründe dafür sind vermutlich in den kanalspezifischen Eigenschaften zu suchen. Analysen dahingehend werden in folgenden Abschnitten durchgeführt. Die Resultate der Kanäle Rot, erste Hauptachse und Intensität schließen sich dem, mit einer Stückelung der Straße in 13,4 bis 13,1 Teile, de facto ohne Unterschiede untereinander an. Damit sind keine Parallelen zur Verifikation zu erkennen. Das beste Resultat wurde im grünen Kanal erzielt, in dem Straßen durchschnittlich aus 12,1 Linienstücken durch Schließung der Lücken extrahiert wurden. Das lässt die Schlussfolgerung zu, dass der grüne Kanal dahingehend gute Rahmenbedingungen liefert.



Ohne damit eine Aussage bezüglich der Verifikationsqualität treffen zu können, wurden die Breiten der Straßen untersucht. Dabei war der kanalspezifische Einfluss von Interesse, der sich durch die kanalweise differierende Breite gleicher Straßen bei der Bestimmung abzeichnet. Dies ergibt sich, da der Kontrast in den Kanälen variiert und dadurch die Interpolation des Straßenrandes unterschiedlich ausfällt. Die ausgegebene Straßenbreite ist nun die Entfernung zwischen extrahierter Mittellinie und dem interpolierten Straßenrand. Demzufolge bezieht sich die Angabe lediglich auf die Hälfte der Straße. Die ungleichen Straßenbreiten in den verschiedenen Kanälen haben jedoch keinen Einfluss auf die Verifikation, da diese nicht breitenabhängig ist und die Straße laut der Modellierung in Kapitel 2 als Linie extrahiert wird. Bei flächenhaften Extraktionsansätzen könnte die festgestellte Breitenvarianz zu Problemen führen. Die Abbildung 9 stellt die unterschiedlichen Straßenbreiten anschaulich dar.

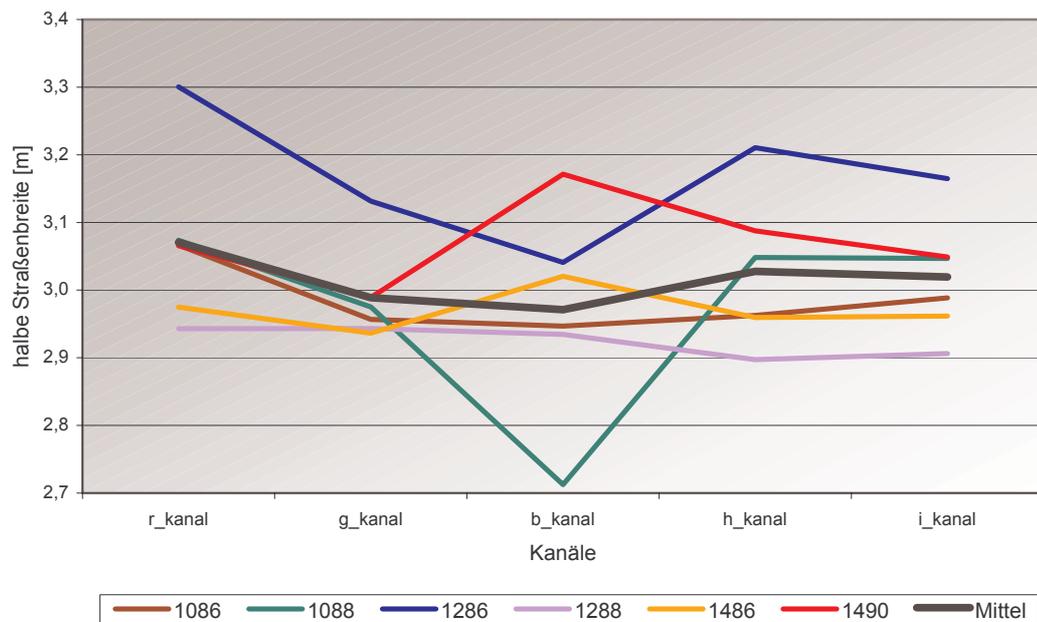


Abbildung 9: Kanalweise Straßenbreiten

Es zeigt sich deutlich, dass die Straßenbreiten kanalweise stark variieren. Der Vergleich einzelner Kurven zeigte dennoch, dass keine Systematik im Verlauf erkannt werden kann. Durch Betrachtung des Mittels lässt sich jedoch eine Tendenz erkennen, die zeigt, dass der rote Kanal dazu neigt, die Straßen etwas breiter darzustellen. Des Weiteren ist zu erkennen, dass Straßen im blauen Kanal am schmalsten erscheinen. Dieses Resultat beruht jedoch einzig auf der außergewöhnlich schmalen Darstellung der Straßen im Bild 1088. Wenn dies in der Betrachtung nicht berücksichtigt wird, ist die Breite der Straßen im blauen



Kanal ebenfalls durchschnittlich. Das hat allerdings aus oben genannten Gründen keinen Einfluss auf die Verifikation.

Die folgenden Untersuchung behandelt die Stabilität der Straßenbreiten in Form der Standardabweichung als Qualitätskriterium der Kanäle. Darin kann davon ausgegangen werden, dass eine geringe Abweichung bei der Bestimmung der Straßenbreite aus den extrahierten Linienstücken ein Indiz für eine stabile Verifikation ist. Das ist anzunehmen, da in der Natur Straßen in ihrer Breite annähernd konstant sind. Dies wurde im Kapitel 2 bei der Modellierung der Straße nach [WIEDEMANN, 2002] festgestellt. Um die Standardabweichungen vergleichen zu können, wurden sie kanalweise gemittelt und in Abbildung 10 dargestellt.

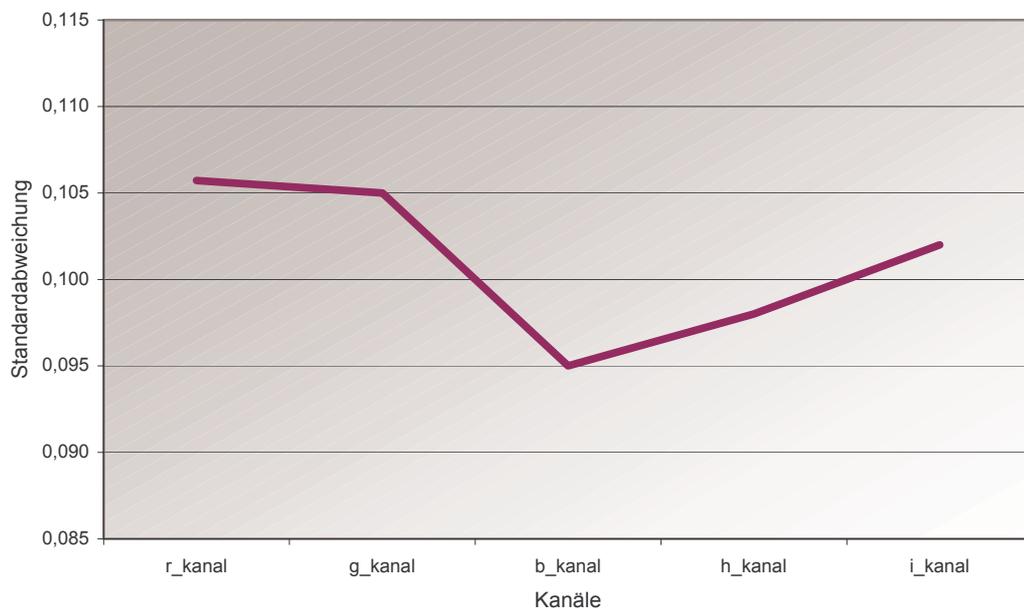


Abbildung 10: Mittel der Standardabweichung

Diagramm 10 zeigt das errechnete Mittel der Standardabweichungen der Breitenbestimmung. Der Wertebereich aller Standardabweichungen erstreckte sich über einen Bereich von 0 bis ca. 0,7 und ist etwa gleich verteilt. Dadurch zeigt sich für das Mittel aller Kanäle, dass eine kanalspezifische Bewertung nicht gerechtfertigt ist, da der Unterschied zwischen bestem und schlechtestem Resultat im berechneten Mittel lediglich 0,01 beträgt. Dies bedeutet für die Auswertung, dass der Verlauf der Kurve als Tendenz zu betrachten ist. In dieser Tendenz wird im blauen Kanal das beste Resultat erzielt, was zeigt, dass die Breitenvarianz der extrahierten Linienstücke in dem Kanal am geringsten ist. Den Erwartungen wird dadurch widersprochen, da eine geringe



Standardabweichung für die Qualität des jeweiligen Kanals spricht. Die höchsten Standardabweichungen wurde im roten Kanal erzielt, was bedeutet, dass dieser Kanal tendenziell schlechte Rahmenbedingungen für eine Verifikation liefert.

Als letzte Analyse der Verifikationsergebnisse mit positiven Eingangsdaten wird nach häufig auftretenden Kombinationen von Kanälen mit ähnlichen Resultaten gesucht. Dies ist gegeben, wenn ein Objekt in mindestens zwei Kanälen verworfen wird. Damit soll untersucht werden, ob Abhängigkeiten zwischen den Ergebnissen verschiedener Kanäle bestehen. Sollte das der Fall sein, werden diese aufgedeckt. Das Ergebnis der Untersuchung ist in Form eines Diagramms in Abbildung 11 dargestellt.

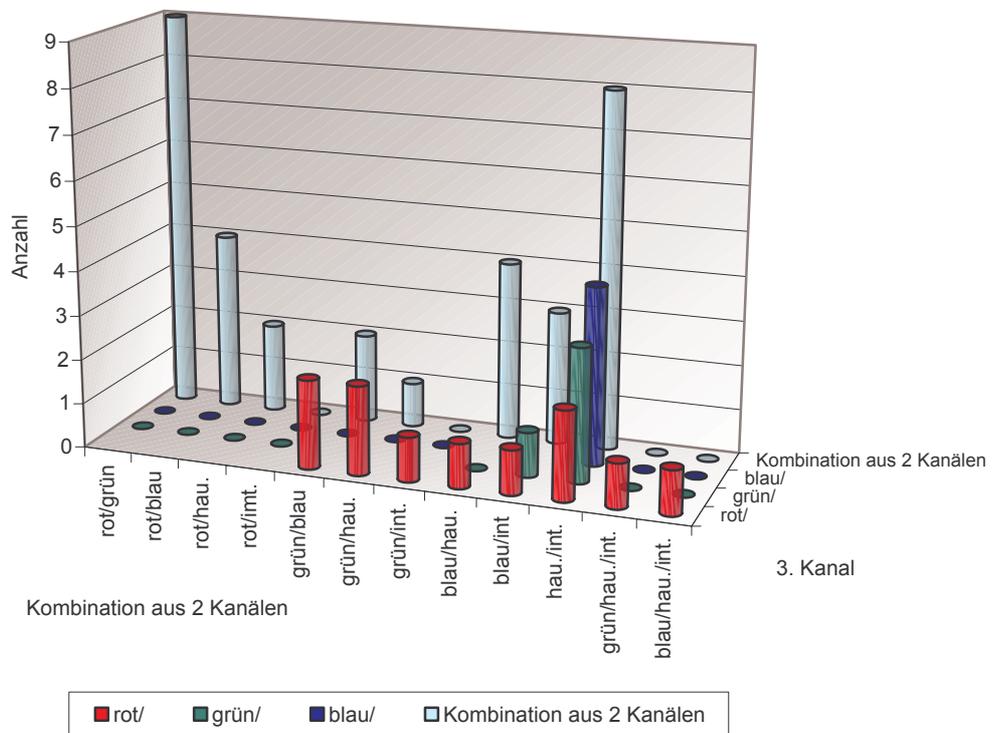


Abbildung 11: Kombination von Kanälen

Darin zeigt die X-Achse die Kombination aus zwei bzw. drei Kanälen. Durch die Y-Achse werden diese Kombinationen der X-Achse um einen weiteren Kanal ergänzt. Damit konnten alle Kombinationen die auftraten erfasst und in einem Diagramm dargestellt werden.

Die Graphik zeigt, dass nur zwei Kombinationen auffällig häufig vorkamen. Zum einen war das die Kombination der Kanäle Rot und Grün, die neun mal auftrat,



und zum anderen die Kombination der Kanäle der ersten Hauptachse und der Intensitäten, die acht mal vorkam. Zudem ist jedoch eine Häufigkeit von neunzehn Kombinationen aufgedeckt worden, in denen sowohl der Kanal der ersten Hauptachse, als auch der Intensitätskanal enthalten sind. Dadurch zeigt sich, dass dahingehend eine geringe Abhängigkeit gegeben ist. Die Aussagefähigkeit dieser Ergebnisse ist allerdings vage, da mit zweiundfünfzig Kombinationen zu wenig Testwerte vorliegen.

5.1.2 Die Sensitivitätsanalyse

In diesem Teil der Untersuchung ist es das Ziel, Aussagen zur Zuverlässigkeit der Verifikationsergebnisse der einzelnen Kanäle treffen zu können. Realisiert wird das, indem die Verifikation mit falschen Daten durchgeführt wird. Für die Eingangsdaten bedeutet es, dass diese keine Straße beinhalten. Die Erwartung an das System war nun, alle Objekte als falsch zu erkennen und nicht zu akzeptieren. Um trotz der Unterschiede der Eingangsdaten, die Ergebnissen zwischen positivem und negativem Datensatz vergleichen zu können, muss der negative Datensatz dem positiven im punkto Geometrie und Anzahl der Objekte entsprechen. Erreicht wurde das durch eine Drehung der positiven, richtigen Daten um 100 gon. Auf diese Weise blieben alle Verhältnismäßigkeiten erhalten. Durch eine Kontrolle ist folgend gewährleistet, dass keine richtigen Straßen vorhanden sind.

Ferner mussten die Steuerparameter aus der Verifikation mit positiven Datensatz übernommen werden, um vergleichbare Aussagen treffen zu können. Die Verifikation wurde wiederum mit der Software Quala für jedes der sechs Bilder in jedem der sieben Kanäle nacheinander im Batch durchgeführt.

Analog zu Kapitel 5.1.1 wird dazu das Ergebnis der Verifikation des blauen Kanals im Bild 1486 gezeigt. Das stellt Abbildung 12 dar. Darin sind die verworfenen Straßen rot und die falsch akzeptierten Straßen grün dargestellt. Es ist des Weiteren im Vergleich zu Abbildung 5 zu erkennen, wie die falschen Eingangsdaten einzig durch Drehung um 100 gon erzeugt wurde.



Abbildung 12: Verifikationsergebnis des blauen Kanals im Bild 1486 mit akzeptierten (grün) und verworfenen Straßen (rot)

Die Ergebnisse der Verifikation liegen in diesem Fall mit einem Unterschied von 1,7% dicht zusammen. Im Durchschnitt, über alle Bilder und Kanäle, wurden 97,8% der Objekte als „falsch“ erkannt und verworfen. Das bedingt im Gegenzug eine Fehlerquote von 2,2%. Dies liegt in dem Fall jedoch unter den Erwartungen und schwankt geringfügig zwischen den Kanälen. Eine deutliche Zweiteilung im Niveau der Extraktionen ist diesmal jedoch nicht zu erkennen. Demnach sind die Abstufungen, die erreicht werden konnten, gering. Die besten Ergebnisse wurden dabei im roten Kanal und im Kanal der Sättigungen mit jeweils 1,2% der akzeptierten Objekte erzielt. Dem schließt sich das Resultat, welches im Intensitätskanal erlangt wurde, mit einer Akzeptanz von 2,1% an. Dem folgt in der Wertung das Verifikationsergebnis des Kanals der ersten Hauptachse (2,5%). Im Kanal des Farbtons und im grünen Kanal konnten jeweils 2,8% der Straßen akzeptiert werden. Damit erreichten diese beiden Kanäle wiederum das gleiche Resultat, welches jedoch bei Betrachtung aller Ergebnisse im unteren Drittel lag. Das schlechteste Resultat wurde, wie in der Verifikation mit richtigen Eingangsdaten, im blauen Kanal mit ca. 3% erzielt. Dargestellt ist dies in Abbildung 13.

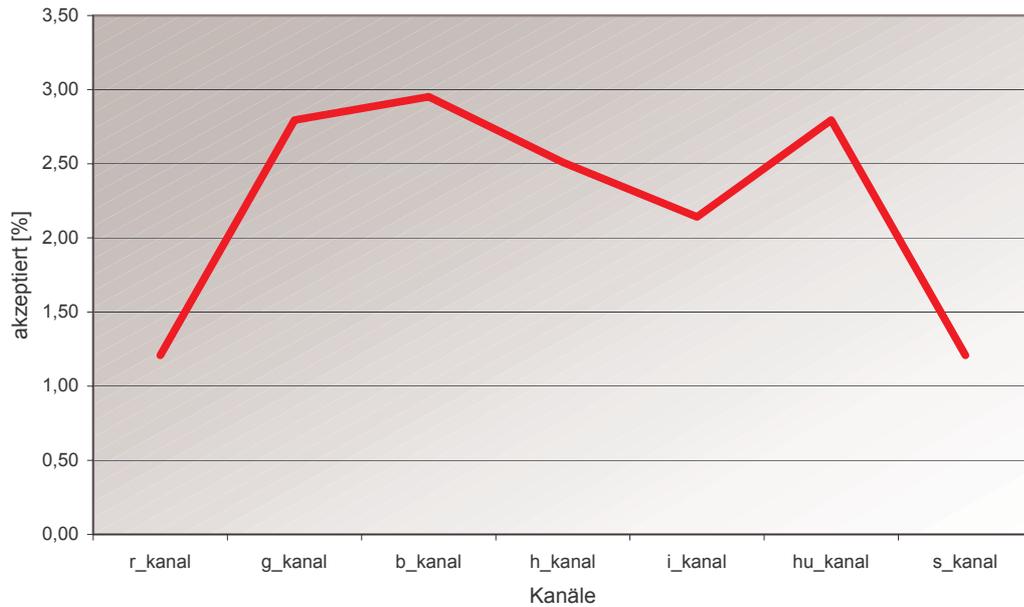


Abbildung 13: Verifikationsergebnis mit negativen Eingangsdaten

Von speziellem Interesse sind die Gründe für die fehlerhaften Verifikationen. Dazu werden die als Straßen erkannten Objekte genauer untersucht. Im einem ersten Schritt wurde durch Kontrolle ausgeschlossen, dass es sich bei der Extraktion zufällig doch um eine Straße oder andere linienhafte Strukturen handelt. Da das nicht der Fall war, wurde untersucht, in welchen Gebieten es vermehrt zur Akzeptanz der falschen Straßen kam. Dabei konnte festgestellt werden, dass 51% der Extraktionen auf Feldern mit optisch rauer Oberfläche stattfanden. Dies war möglich, da durch die hohen Grauwertunterschiede kurze Linien extrahiert werden konnten, die anschließend verbunden wurden. Ähnlich fand das auch bei den 39,2% der falschen Extraktionen statt, die auf bewaldetes Gebiet entfielen. Dieses Ergebnis spiegelte so nicht die Erwartungen wieder, da das bewaldete Gebiet aufgrund der spektralen Eigenschaften als Hauptfehlerquelle galt. Die vermehrten Extraktionen in agrarökonomisch genutzten Bereichen ist wohl mit dem homogeneren Verlauf der Grauwerte zu erklären. Sollten die Grauwertunterschiede zweier benachbarter Pixel zu groß sein, wie es in bewaldeten Gebieten vermehrt vor kommt, ist eine Extraktion aufgrund des in den Steuerparametern festgesetzten Hystereseschwellwertes nicht möglich. Der kleinste Fehleranteil entfiel auf die urbanen Gebiete. Darin fanden 9,8% der Extraktionen statt. Abschließend muss zu den Ergebnissen ergänzt werden, dass sie nur bedingt aussagekräftig sind, da die drei Kontextregionen nicht zu gleichen Teilen vorhanden waren. Für die Untersuchungen dieser Arbeit wurde speziell Bildmaterial gesucht, in dem die Region agrar stark überwiegt. Das begründet die hohe Anzahl der Extraktionen



in diesem Gebiet. Im Bild 14 sind die drei Regionen, mit jeweils falschen Ergebnissen der Verifikation dargestellt.

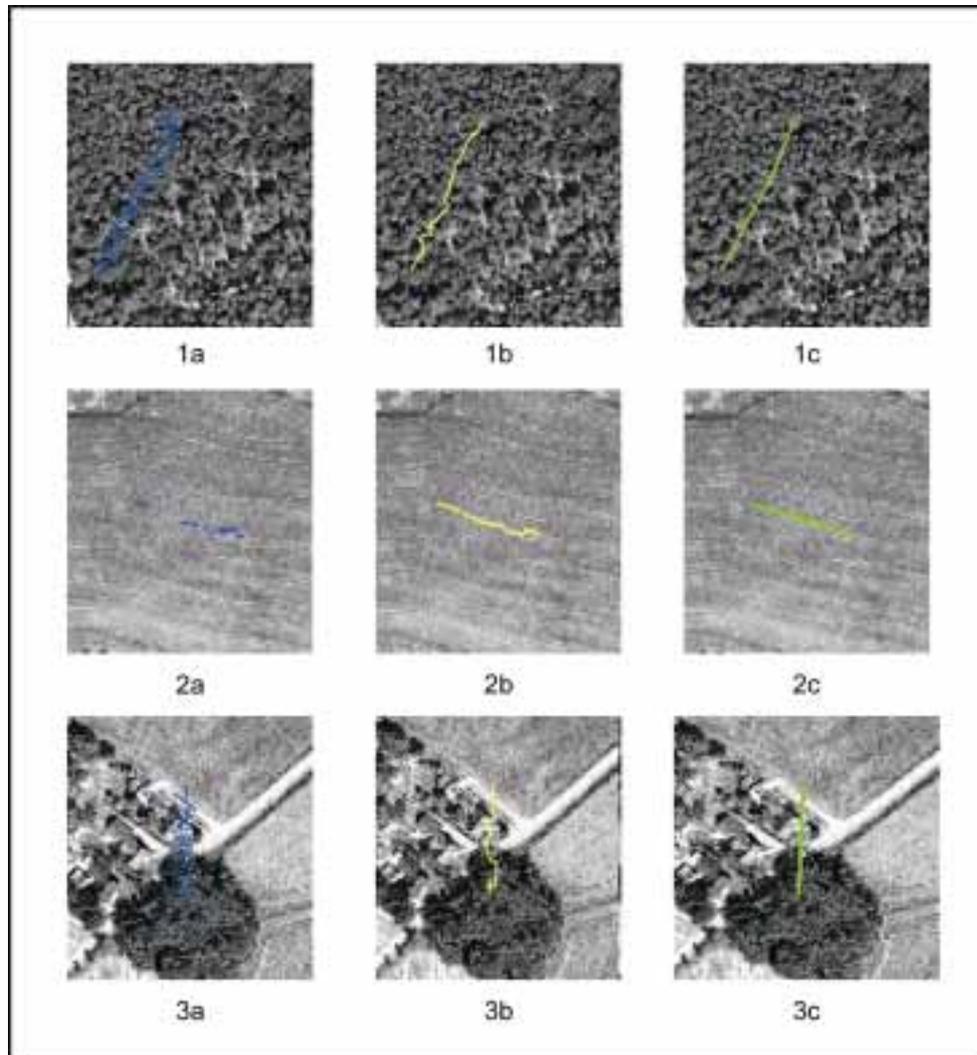


Abbildung 14: Fehlerhafte Verifikation: a) Extraktion, b) Ergebnis der Verknüpfung, c) Bewertung (grün = akzeptiert), 1) forest, 2) agrar, 3) urban + forest

Auch diese Ergebnisse können nicht einzeln bzw. unabhängig von der Verifikation mit positivem Datensatz betrachtet werden. Aus dem Grund muss für endgültige Aussagen eine Verknüpfung der Ergebnisse statt finden. Damit beschäftigt sich im folgenden der Abschnitt der Auswertung der Verifikation (5.1.3).

Als einzige Analyse aus den Daten der Straßenbreiten, wurde die Untersuchung der Anzahl der Linienstücke durchgeführt. Diese erschien als einzige sinnvoll, da sie Aufschluss über die extrahierten Linienstücke gibt, die letztendlich zur Verifikation führten. Das wurde aus bereits genannten Gründen



exemplarisch in den Kanälen Rot, Grün, Blau, erste Hauptachse und der Intensitäten durchgeführt. Die Analyse der Straßenbreite oder deren Standardabweichung erscheint irrelevant, da darin keine Aussagen bezüglich der Fehlverifikationen enthalten sind. Die Untersuchungen der Anzahl der Linienstücke gestaltet sich auf Grund der wenigen Extraktionen schwierig, da durchschnittlich nur zwischen acht und neun Werte pro Kanal zur Verfügung standen. Aus dem Grund wurde auf eine bildweise Trennung der Ergebnisse verzichtet. Es wurden die Mittelwerte kanalweise über alle Bilder berechnet, welche graphisch in Abbildung 15 dargestellt werden.

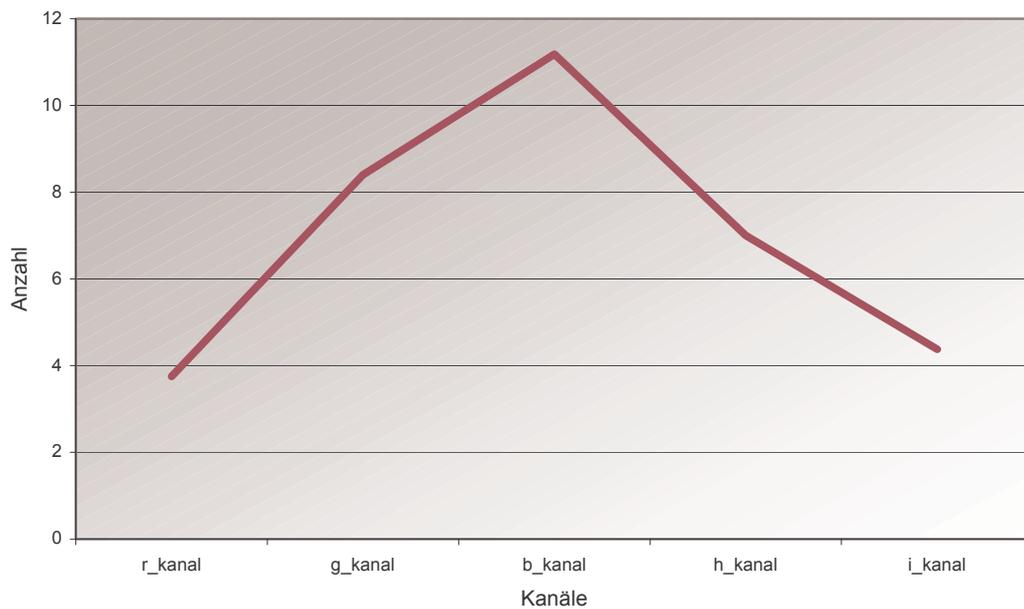


Abbildung 15: Anzahl n der Linienstücke im Mittel

Darin ist deutlich eine große Abweichung in der Anzahl der Linienstücke zu erkennen. Im blauen Kanal wurden die extrahierten Linien durchschnittlich aus elf Teilextraktionen verknüpft, im roten Kanal hingegen nur aus vier. Die Verifikationsergebnisse aus Abbildung 13 geben ebenfalls den blauen und den grünen Kanal als die beiden Extremsten wieder. Demnach sind Abhängigkeiten dahingehend nicht auszuschließen. Eine Vielzahl an kurzen Linienextraktionen unterstützt die Verifikation falscher Objekte, da es durch die hohe Anzahl an Linienstücken zu kleineren Lücken kommt, die deshalb geschlossen werden können. Der Grund dafür ist in der Grauwertanalyse zu suchen und wird folgend behandelt.



5.1.3 Die Verknüpfung der Verifikation mit positiven und negativen Eingangsdaten

Um die Ergebnisse, wie sie in den Verifikationen bisher erzielt wurden, werten zu können, müssen diese verknüpft werden. Das ist nötig, da es die Zielsetzung ist, nicht möglichst viel sondern möglichst sicher zu verifizieren. Dadurch eignet sich ein Kanal, der augenscheinlich eine hohe Anzahl an Extraktionen mit positiven Eingangsdaten aufweist, nicht zwangsläufig, wenn er ebenfalls viele Extraktionen mit inkorrekten Daten erzielt. Um die Ergebnisse dahingehend überprüfen zu können, müssen sie verknüpft werden. Dies geschieht, indem die Resultate in einer Matrix zusammengefügt werden. Dabei wird unterschieden zwischen den `true positiv` (TP) und den `false negativ` (FN) als akzeptierte und verworfene Ergebnisse aus der Verifikation mit positiven Eingangsdaten und den `false positiv` (FP) und den `true negativ` (TN) als akzeptierte und verworfene Resultate der Sensitivitätsanalyse. Das ist graphisch in Tabelle 7 dargestellt.

	positive Eingangsdaten	negative Eingangsdaten
akzeptiert	true positiv (TP)	false positiv (FP)
verworfen	false negativ (FN)	true negativ (TN)

Tabelle 7: Matrix der Verifikationsergebnisse mit positiven und negativen Eingangsdaten

In der Matrix gilt es nun, die Werte `true positiv` und `true negativ`, die auf der Hauptdiagonalen liegen, als die richtigen Ergebnisse zu maximieren. Im Gegenzug sollen die falschen Werte `false negativ` und `false positiv`, als Fehlschluss erster und zweiter Art, so gering wie möglich, im Optimalfall nahe Null gehalten werden.¹⁰ Um Aussagen bezüglich dieser Verhältnismäßigkeit treffen zu können, muss ein numerisches Qualitätsmaß gefunden werden, was dies in möglichst einer Zahl zusammenfasst. Dabei wurde sich für die Nutzung der Determinante entschieden, welche das Produkt aus den „richtigen“ Werten bildet und das Produkt der Fehler davon abzieht. Die Berechnung erfolgt nach der Formel :

$$\det E = [(TP) \cdot (TN)] - [(FN) \cdot (FP)] \quad (5.1.)$$

¹⁰ [PELZER, 1980]



Mit der Determinante ist es verhältnismäßig einfach, die einzelnen Ergebniskonstellationen zu vergleichen. Je höher der für den jeweiligen Kanal errechnete Wert ist, desto günstiger ist das Verhältnis zwischen Verifikation und Sensitivitätsanalyse. *Eins* bildet hier das Maximum, in dem ausschließlich korrekte Resultate erzielt wurden. Im Gegenzug dazu bildet *minus eins* den negativsten Fall, in welchem ausschließlich Fehler vorhanden sind. Das gilt nur, da die Verifikation mit positiven und negativen Eingangsdaten getrennt ablief und somit für beide Spalten der Tabelle 7 jeweils 100% der Ergebnisse zur Verfügung stehen. Die Berechnung der Determinante wurde für jedes Bild in jedem Kanal durchgeführt, wobei die in Tabelle 8 dargestellten Ergebnisse erzielt wurden.

Kanal\Bild	1086	1088	1286	1288	1486	1490	Mittel
r_Kanal	0,87	0,87	0,89	0,90	0,91	0,78	0,870
g_Kanal	0,91	0,89	0,86	0,84	0,91	0,84	0,877
b_Kanal	0,86	0,76	0,87	0,88	0,87	0,84	0,847
h_Kanal	0,91	0,85	0,87	0,88	0,92	0,86	0,882
i_Kanal	0,91	0,89	0,86	0,91	0,87	0,84	0,881
hu_Kanal	0,91	0,89	0,83	0,84	0,91	0,84	0,863
s_Kanal	0,87	0,87	0,86	0,90	0,91	0,78	0,866

Tabelle 8: Tabelle der Determinanten

Die Tabelle zeigt, dass die Werte der Determinanten zwischen 0,76 und 0,91 schwanken. Von wirklichem Interesse sind allerdings die kanalweisen Resultate, welche in Form des Mittels zusammengefasst wurden. Darin lassen sich kanalspezifische Unterschiede festmachen. Verdeutlicht wird das in Abbildung 16, die Tabelle 8 in Form eines Diagramms darstellt.

Darin ist zu erkennen, dass der blaue Kanal die unsichersten Ergebnisse liefert. Dem Resultat folgt in der Bewertung der Kanal des Farbtons und der Sättigungskanal mit ebenfalls schlechten Resultaten. Die beste Bewertung erzielte der Kanal der ersten Hauptachse, mit jedoch geringem Unterschied zum Intensitätskanal. Diese Ergebnisse sind daher als nahezu gleich zu betrachten. Die Kanäle Grün und Rot befinden sich in der Wertung durch die Determinanten zwischen den Extremen und somit im Mittelfeld. Damit werden weder besonders gute noch auffällig schlechte Ergebnisse erzielt.

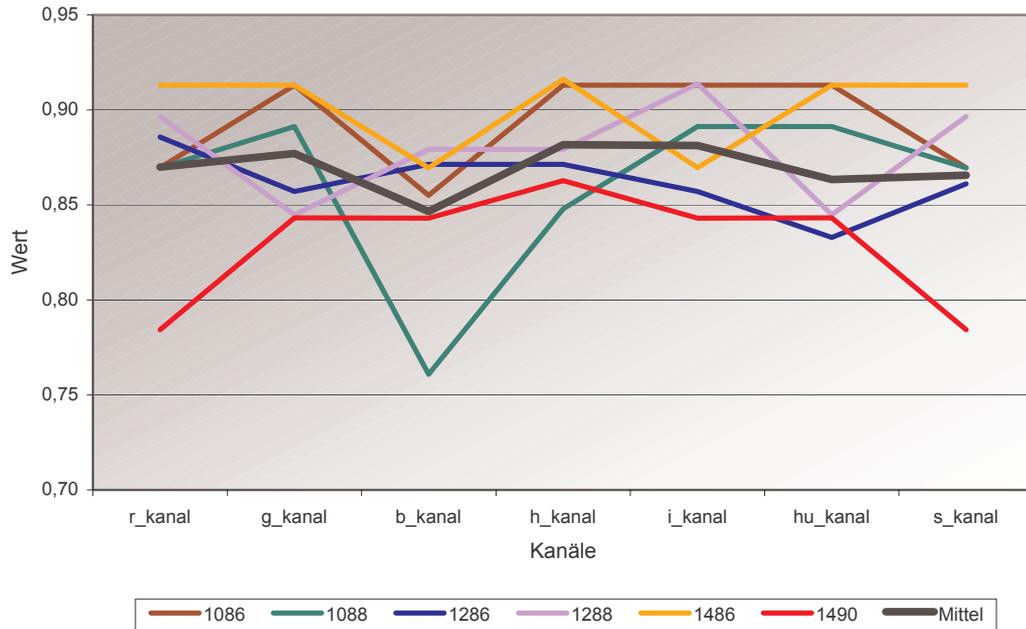


Abbildung 16: Determinanten im festgesetzten Parametersatz

Die Betrachtung der Resultate der Verifikationen mit richtigen und falschen Eingangsdaten ist somit abgeschlossen. Es folgt eine Grauwertanalyse, von der sich erhofft wird, genauere Informationen bezüglich der Kanäle und ihrer Eignung zu erhalten.

5.1.4 Die Analyse mittels Grauwertprofilen

Die Ergebnisse, wie sie in den vorangegangenen Abschnitten des Kapitels erzielt wurden, gilt es zu begründen. Des Weiteren interessieren die radiometrischen Unterschiede für die folgenden Betrachtungen. Dafür wurden die Analysen in den Kanälen Rot, Grün, Blau, erste Hauptachse und Intensitäten exemplarisch, aus in Kapitel 5.1.1 genannten Gründen, durchgeführt. Zur Untersuchung der Eigenschaften eignen sich Grauwertprofile, welche im Bild gelegt werden und pixelweise den Grauwertunterschied aufzeigen, wodurch kanalspezifische Unterschiede erkannt werden können. Dabei ist für die Verifikation der Grauwertverlauf sowohl quer als auch längst zum Verlauf der Straße von Interesse. Das begründet sich mit dem schematischen Ablauf der Verifikation, wie er bereits in Kapitel 2 dargestellt wurde. Die Suche nach Straßen beruht zum einen auf einem möglichst großen Grauwertunterschied zwischen Straße und Umgebung und zum anderen auf



einem möglichst harmonischen und gleichförmigen Grauwertverlauf in Richtung der Straße. Daraufhin werden die einzelnen Kanäle untersucht. Dies wurde mit einem Tool der Software ERDAS-Imagine 8.5 durchgeführt, welches die Grauwerte entlang einer gezogenen Linie tabellarisch Pixelweise auflistet und in einem Diagramm darstellt. Hierbei werden die verschiedenen Kanäle eines Bildes verlinkt, wodurch gesichert ist, dass das Grauwertprofil in jedem Kanal an der gleichen Stelle erzeugt wird, was die Vergleichbarkeit der Ergebnisse kanalweise sichert.

Dies wurde für vier der sechs Bilder durchgeführt, in dem pro Bild situationsbedingt zwischen sechs und zehn Grauwertprofile quer zur Straße und zwischen fünf und sechs Grauwertprofile längs der Straße gelegt wurden. Damit stehen der Untersuchung 27 Profile quer und 23 Profile längs zur Verfügung, was ermöglicht, ein repräsentatives Ergebnis zu erzielen.

Als erstes wurden Straßen im Bildmaterial ausgesucht. Es wurde darauf geachtet, dass sowohl vollständig in allen Kanälen akzeptierte Straßen gewählt werden, als auch welche, die kanalweise keine Verifikation ermöglichten. Mit diesem Vorgehen sollte erreicht werden, eventuell Abhängigkeiten dahingehend zu erkennen.

Anschließend konnten die Grauwertprofile quer zum Verlauf der Straße gelegt werden. Bei der Auswertung der Ergebnisse wurden im ersten Schritt die Diagramme, die das Grauwertprofil repräsentierten, erstellt. Dabei fiel auf, dass im Kanal der ersten Hauptachse eine Verschiebung des charakteristischen Profils um jeweils ein bis zwei Pixel stattfand. Zu beobachten war dies in 14 der 27 Profile. Abbildung 17 stellt das beispielhaft an einem Objekt im Bild 1490 dar. Daran wird deutlich, dass im Kanal der ersten Hauptachse das Profil einen verschobenen Verlauf hat, wodurch sich die Lage der Straße um mehrere Pixel verschiebt. Da im verwendeten Bildmaterial die Pixelgröße 1,25 m beträgt, ist eine Abweichung in der Dimension beträchtlich. Zu erklären ist das durch die Erzeugung des Kanals. Dabei kommt es durch Drehung des Merkmalsraumes zu einer Transformation, bei der die Grauwerte der Pixel neu verteilt werden. Bei ungünstiger Lage der Straße im Ausgangsbild kann es also zu Verschiebungen dahingehend kommen. Das ist nicht zwangsläufig der Fall, allerdings trat es in 51% der Fälle der Testreihe auf. Dadurch ist der Kanal der ersten Hauptachse nur bedingt für Extraktionen mit einem gesteigerten Anspruch an geometrische Richtigkeit zu empfehlen.

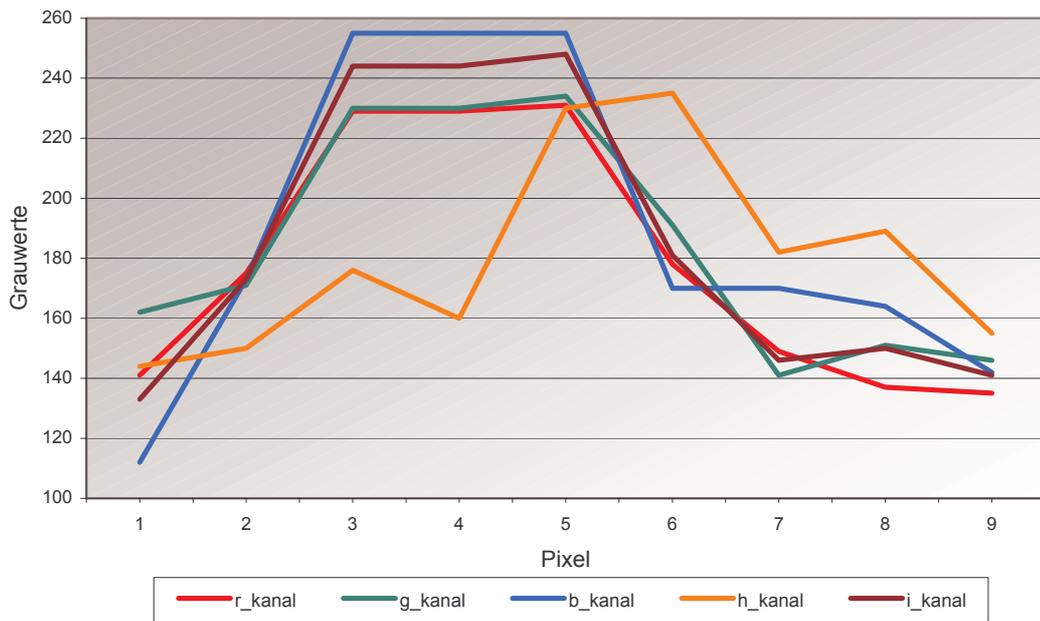


Abbildung 17: Grauwertprofil quer zum Verlauf einer Straße

Einen weiteren Teil der Analysen bildete die Untersuchung des Kontrastes in den verschiedenen Kanälen. Dazu ist es nötig, den Anstieg der Kurve zwischen Straßenrand und Straße zu bestimmen, da dieser ausschlaggebend für die Extraktion im jeweiligen Kanal ist. Der Kontrast in Form des Anstieges bestimmt sich als Funktion des Grauwertunterschiedes und der Entfernung. Da die Profile zum Abgreifen der Grauwerte in allen Kanälen durch Verlinkung dieser an den gleichen Stellen lagen, stammen die Grauwerte von den gleichen Pixeln. Damit ist die Entfernung, die in die Berechnung einfließt, für jedes Objekt gleich, wodurch sie als konstanter Faktor aus der Rechnung herausgekürzt werden kann. Die Verhältnismäßigkeiten bleiben demnach erhalten. Damit zeigt das Ergebnis den Grauwertunterschied, den Straße und Umgebung in verschiedenen Kanälen aufweisen. Der Grauwertunterschied wurde sowohl für den positiven als auch für den negativen Anstieg der Kurve bestimmt und anschließend für die Auswertung objekt- und kanalweise gemittelt. Dadurch erhält man in einem Diagramm Kurven, wie Abbildung 18 darstellt, welche kanalweise die Kontrastverhältnisse in Form der Grauwertunterschiede gleicher Pixel zeigen.

In dem Diagramm ist deutlich eine Systematik im Verlauf der Kurven zu erkennen. Es wird klar, dass der Kontrast bzw. der dargestellte Grauwertunterschied im blauen Kanal das höchste und damit beste Resultat erreicht. Dies widerspricht allerdings dem im Kapitel 5.1.1 erzielten Ergebnis der Verifikation, in dem der blaue Kanal die schlechteste Bewertung erhielt. Ein



gutes Kontrastverhältnis, wie es in dem Fall gegeben ist, wirkt sich jedoch positiv auf die Verifikation aus. Damit ist eine andere Begründung der Ergebnisse, wie sie bei der Verifikation für den blauen Kanal erzielt wurden, zu suchen.

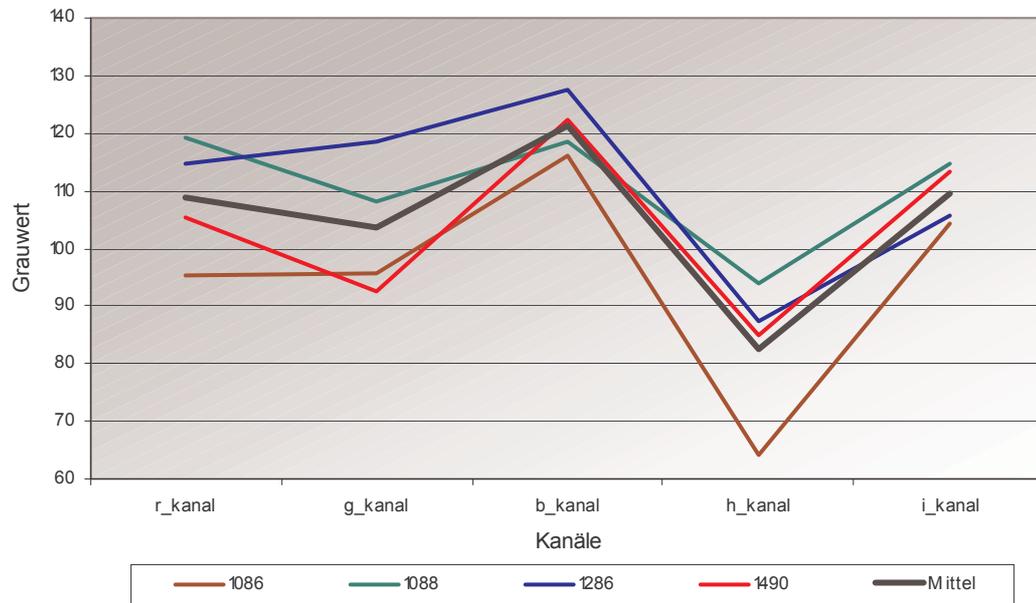


Abbildung 18: Kontrast im Bildmaterial NRW

Ein ebenfalls gutes Kontrastverhältnis weist der Intensitätskanal auf. Das erfüllt die Erwartungen, da dieser Kanal ebenfalls bei der Verifikation mit positivem Datensatz ein gutes Ergebnis erzielte. Die Kanäle Rot und Grün zeigen ähnliche Resultate auf, was jedoch so nicht dem Ergebnis der Verifikation entsprach. Darin schnitt der grüne Kanal gut ab, was vom roten Kanal nicht zu behaupten ist. Das schlechteste Resultat wurde im Kanal der ersten Hauptachse erzielt, was den Erwartungen nicht gerecht wurde. In der Verifikation erlangte der Kanal die beste Bewertung. Ein gutes Kontrastverhältnis unterstützt jedoch die Verifikation.

Abschließend muss zu den Ergebnissen ergänzt werden, dass sie teilweise nicht die Resultate bestätigten, wie sie bei der Verifikation erzielt wurden. Das gilt besonders für den blauen Kanal und den der ersten Hauptachse, da sich diese Ergebnisse scheinbar ausschließen. Eine Begründung ist damit in der Grauwertanalyse entlang der Straße zu erwarten, da der Verlauf ebenfalls für die Verifikation von entscheidender Bedeutung ist.



Die Untersuchungen zum Grauwertverlauf in Richtung der Straße gestalten sich ähnlich wie die Analyse der Straße quer zum Verlauf. Das Grauwertprofil wurde jeweils auf die Mittelachse der ausgewählten Straßen gelegt. Durch Verlinkung der Kanäle wurde gewährleistet, dass die Grauwerte, die in den Kanälen untersucht werden, von den gleichen Pixeln stammen. Es konnte als Ergebnis der pixelweise Grauwertverlauf tabellarisch erfasst und analysiert werden. In Abbildung 19 ist ein solcher Verlauf gezeigt.

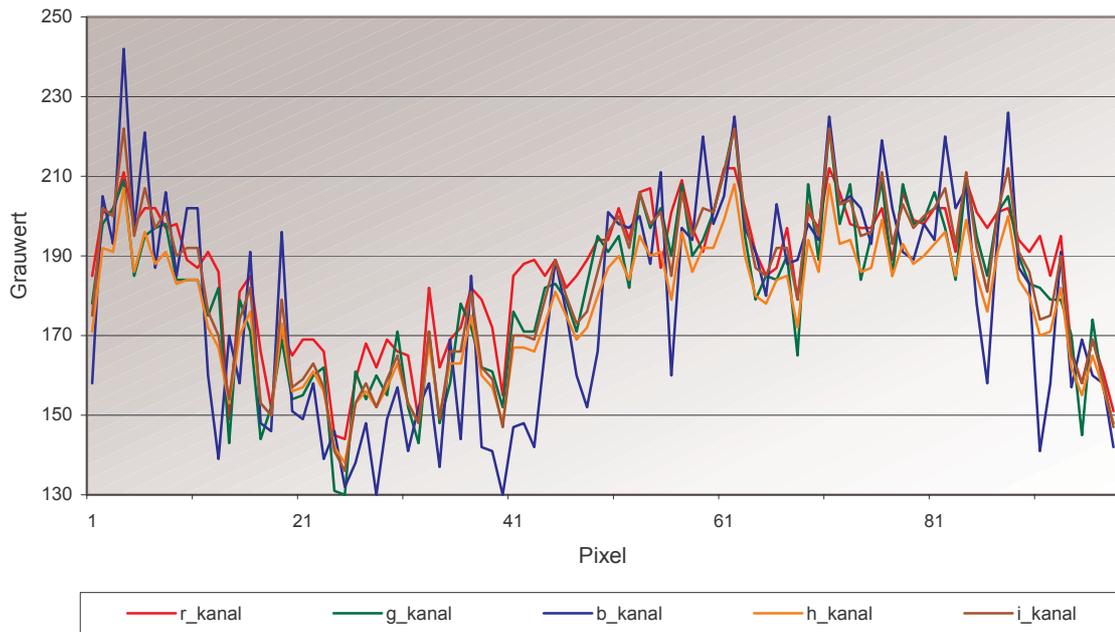


Abbildung 19: Grauwertverlauf in Richtung der Straße

Das Diagramm stellt die Grauwertvarianz eines Objektes kanalweise dar. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass sich der blaue Kanal aus der Menge der Kanäle in seinem Verlauf abhebt. Das wurde nicht nur bei dem gezeigten Objekt beobachtet, sondern findet in der gesamten Testreihe Bestätigung.

Um dies genauer zu analysieren, wurden die Unterschiede der Grauwerte pixelweise beleuchtet. Dazu wird jeweils die Differenz zweier benachbarter Pixel berechnet. Das Diagramm, welches sich daraus für das gleiche Objekt ergibt, ist in Abbildung 20 dargestellt.

Darin wird beispielhaft gezeigt, dass der blaue Kanal die größten Abweichungen der Grauwerte im Verlauf der Straße aufweist. Das bestätigt die Ergebnisse der Verifikation des Kapitels 5.1.1. In dem Beispiel ist neben der Auffälligkeit des blauen Kanals eine große Grauwertvarianz des grünen Kanals zu erkennen. Dem ist allerdings keine Bedeutung beizumessen, da sich dies bei



Betrachtung aller Ergebnisse nicht bestätigte. Die weiteren Kanäle haben einen harmonischen und gleichförmigen Verlauf. Dies konnte bei der gesamten Testreihe beobachtet werden.

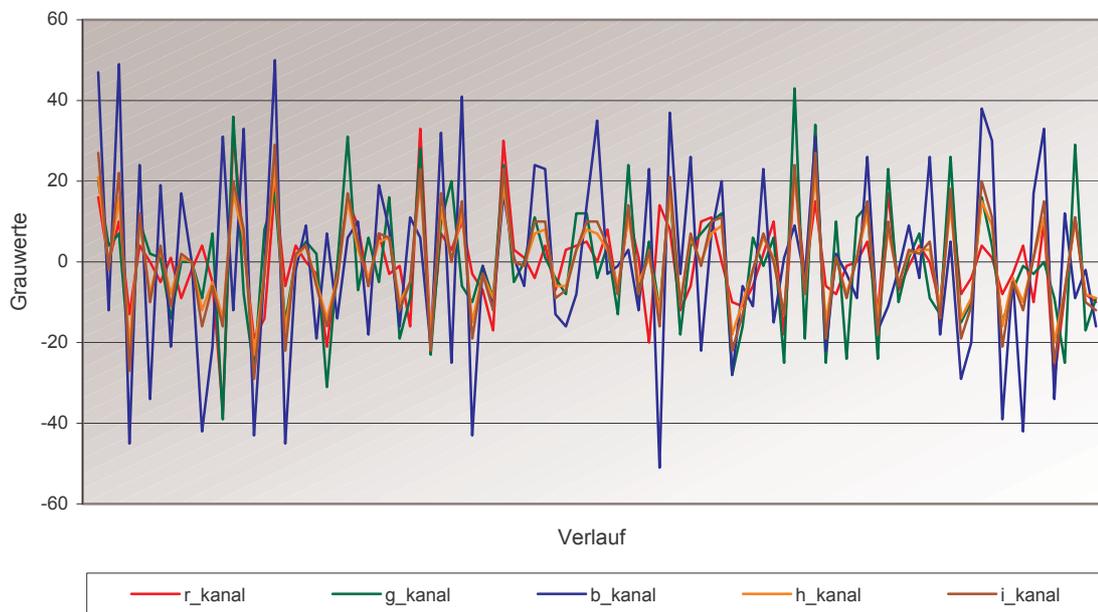


Abbildung 20: Grauwertdifferenzen benachbarter Pixel

Um das allerdings mit Gewissheit behaupten zu können, wurden die berechneten Differenzen benachbarter Pixel in allen Profilen aufsummiert, gemittelt und verglichen. Dabei ergab sich Abbildung 21, in welcher der durchschnittliche Grauwertunterschied zweier benachbarter Pixel kanalweise dargestellt ist.

Diese Graphik zeigt deutlich, was nach Betrachtung des Profils eines Objektes in Abbildung 20 vermutet wurde. Der blaue Kanal weist mit einem durchschnittlichen Grauwertunterschied von 19,53, zweier benachbarter Pixel, den unharmonischsten Verlauf auf. Damit wird die Verifikation erschwert, da diese davon ausgeht, dass Straßen eine gleichförmige Oberfläche besitzen und daraus ein homogener Verlauf der Grauwerte resultiert. Der grüne Kanal folgt mit einem ca. 20% gleichförmigeren Verlauf. Die Grauwerte weisen durchschnittlich einen Grauwertunterschied zum Folgepixel von 15,75 auf. Ebenfalls in der Dimension befinden sich die Resultate des Kanals Rot und des Kanals der Intensitäten. Den konstantesten Verlauf, mit einem Grauwertunterschied von 12,73 zum Folgepixel und damit ein um ca. 35% besseres Ergebnis als der blaue Kanal, lieferte der Kanal der ersten



Hauptachse. Dadurch bestätigte sich wiederum das Resultat der Verifikation aus Kapitel 5.1.1.

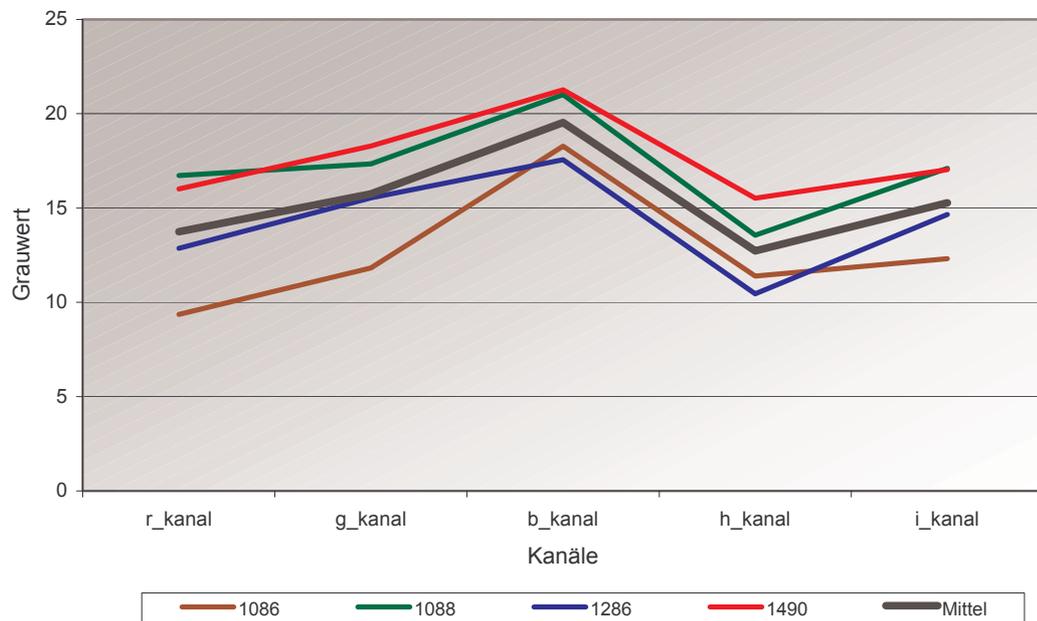


Abbildung 21: Grauwertunterschied im Mittel

Im Anschluss daran wurde eine Analyse der einzelnen Grauwerte der Kanäle durchgeführt. Da sich die Pixel zwischen den Kanälen, ausgenommen des Kanals der Hauptachse nicht verändern, sondern nur deren Grauwerte, konnte ein genereller Vergleich durchgeführt werden. Da diese Unveränderlichkeit der Pixellage allerdings für den die Untersuchung unerlässlich ist, konnte leider der Kanal der Hauptachse bei den Betrachtungen nicht mit einbezogen werden. Es wurden die einzelnen Grauwertunterschiede im Bezug zum roten Kanal untersucht und in Abbildung 22 dargestellt. Damit kann eine kanalweise Aussage über das absolute Grauwertniveau gefällt werden.

Es zeigt sich, dass durchaus eine Systematik hinter den verschiedenen Grauwertniveaus zu vermuten ist. Die Betrachtung bezieht sich auf den roten Kanal als Nullpunkt. Dieser wurde willkürlich ausgewählt, ohne das Wissen, dass er das niedrigste Grauwertniveau besitzt. Das stellte sich erst während der Analyse heraus. Die Untersuchung zeigte des Weiteren, dass die Pixel im Intensitätskanal durchschnittlich um 3,8 Grauwerte heller sind. Da es sich bei den Intensitäten einzig um den Helligkeitsanteil des Bildes handelt und nicht wie bei den Farbkanälen um eine schwarz-/ weiß-Darstellung der jeweiligen Farbe, war zu erwarten, dass das Helligkeitsniveau der Darstellung geringfügig höher liegt. Daran schließt sich der grüne Kanal mit einer Differenz zu Rot von 3,1



Grauwerten pro Pixel an. Am dichtesten an dem Niveau des roten Kanals lag Blau, mit einem durchschnittlichem Unterschied von 2,1 Grauwerten. Die Analyse gibt eine Auskunft bezüglich der grundlegenden kanalspezifischen Eigenschaften.

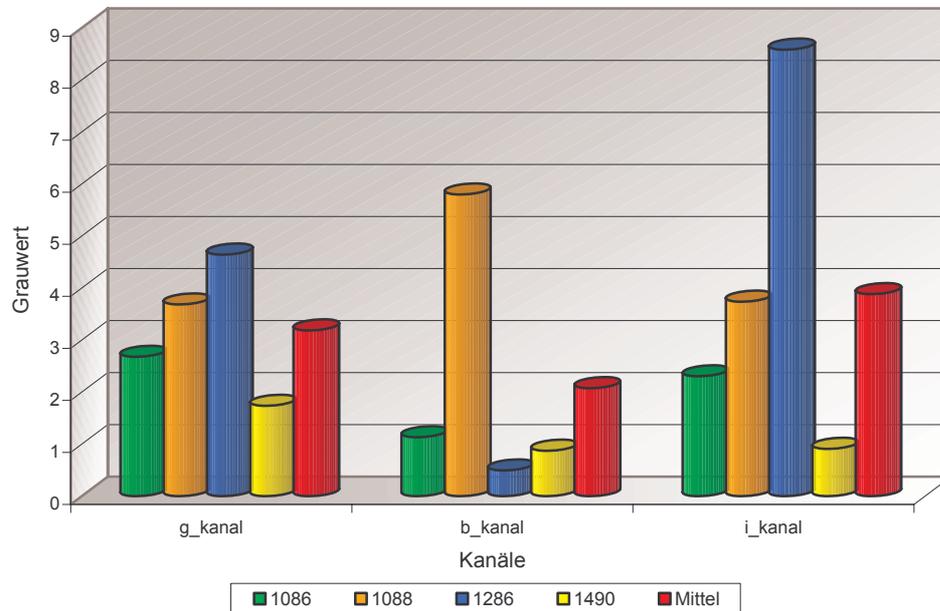


Abbildung 22: Absolutes Grauwertniveau im Bezug zu Rot

5.1.5 Die Verifikation von Baumreihen

Bisher wurden die Untersuchungen zur Tauglichkeit der verschiedenen Kanäle zur Verifikation einzig an Straßen getestet. Es wurde nicht nur auf die Vollständigkeit der Verifikation Wert gelegt, sondern in der Sensitivitätsanalyse auch auf die Sicherheit. Um die Analyse dahingehend zu vertiefen, müssen potenzielle Fehlerquellen getestet werden. Das betrifft generell linienhafte Strukturen, die sich in Straßennähe bzw. in Bufferweite befinden. Dazu gehören laut [GERKE ET AL., 2003] speziell Baum- und Buschreihen neben Straßen, die zu dem einen parallelen Verlauf aufweisen können. In der Verifikation kann es dazu kommen, dass die Linienextraktion von der Straße auf die kontrastreicheren Baumreihen in unmittelbarer Nähe springt und damit die Verifikation der Straße geometrisch inkorrekt ist. Das Problem ergibt sich durch die nicht mögliche Trennung der Semantik bei parallelem Verlauf. Daher ist dies zu untersuchen, was das Ziel dieses Kapitels darstellt.



Zur Realisierung dessen wurden in einem ersten Schritt Baumreihen, die eine potentielle Gefahr für die Verifikation darstellen, gezielt gesucht und digitalisiert. Es wurde darauf geachtet, einzig Baum- und Buschreihen auszuwählen, die sich in Straßennähe befinden und auf Grund ihrer Beschaffenheit in der Verifikation akzeptiert werden können. Das bedeutet, dass sie dem Modell, wie es in Kapitel 2 erläutert wurde, entsprechen. Die Baumreihen durften nicht zu breit sein, sollten sich nach Möglichkeit vom Umland gut abheben und verhältnismäßig geradlinig und homogen im Verlauf sein. Auf Grund dieser Anforderungen wurden in vier ausgewählten Bildern einhundertzwei Baumreihen mit einer Länge von ca. 20 km digitalisiert. Damit stehen durchschnittlich sechszwanzig Baumreihen mit einer Länge von ca. 5 km pro Bild zur Verfügung. Die Digitalisierung wurde abermals mit der Software ArcEdit durchgeführt. Anschließend konnte der Verifikationsprozess, welcher wiederum im Batch ablief, gestartet werden.

In der folgenden Abbildung ist zur Steigerung der Anschaulichkeit, eine Extraktion von Baumreihen im Bild 1086 im roten Kanal dargestellt. Darin wurden die grünen Baumreihen als Straßen akzeptiert und die roten korrekterweise verworfen. Des Weiteren ist der Verlauf der digitalisierten Baumreihen gut zu erkennen.

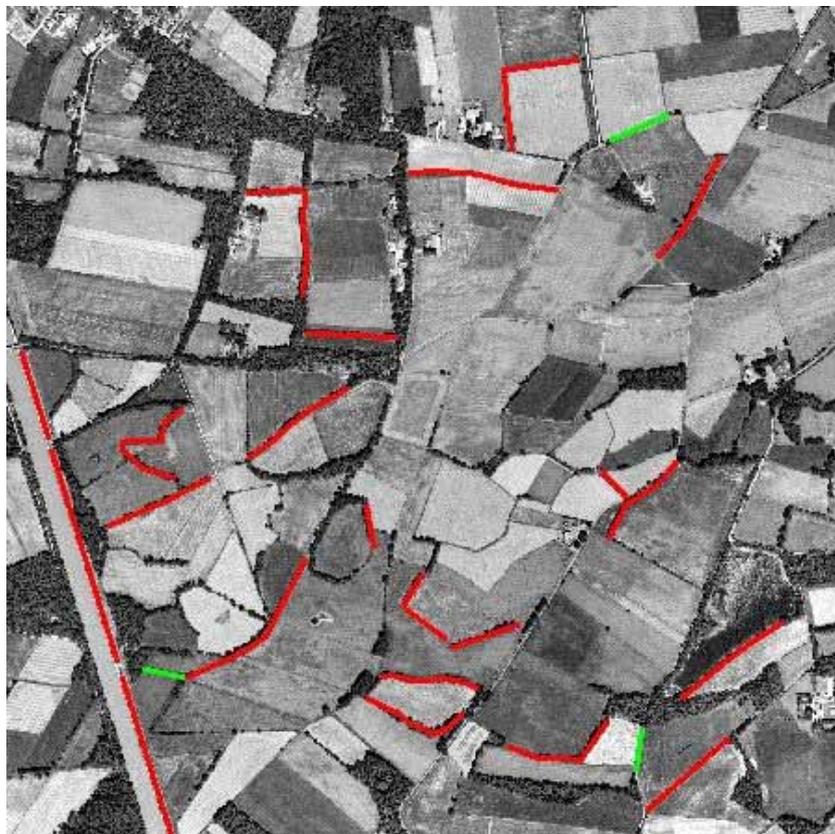


Abbildung 23: Verifikationsergebnis des roten Kanals im Bild 1086, mit akzeptierten (grün) und verworfenen Baumreihen (rot)



Die Erwartung an die Software Quala war nun, so wenig wie möglich zu akzeptieren bzw. alles zu verwerfen. Sollte es dennoch zu Extraktionen kommen, handelt es sich dabei um einen Fehlschluss zweiter Art, auch 'false positiv' genannt.¹¹ Das bedeutet, dass das falsche Ergebnis angenommen und das korrekte Resultat verworfen wird. Die Ergebnisse dessen sind in der Abbildung 24 in Form eines Diagramms dargestellt.

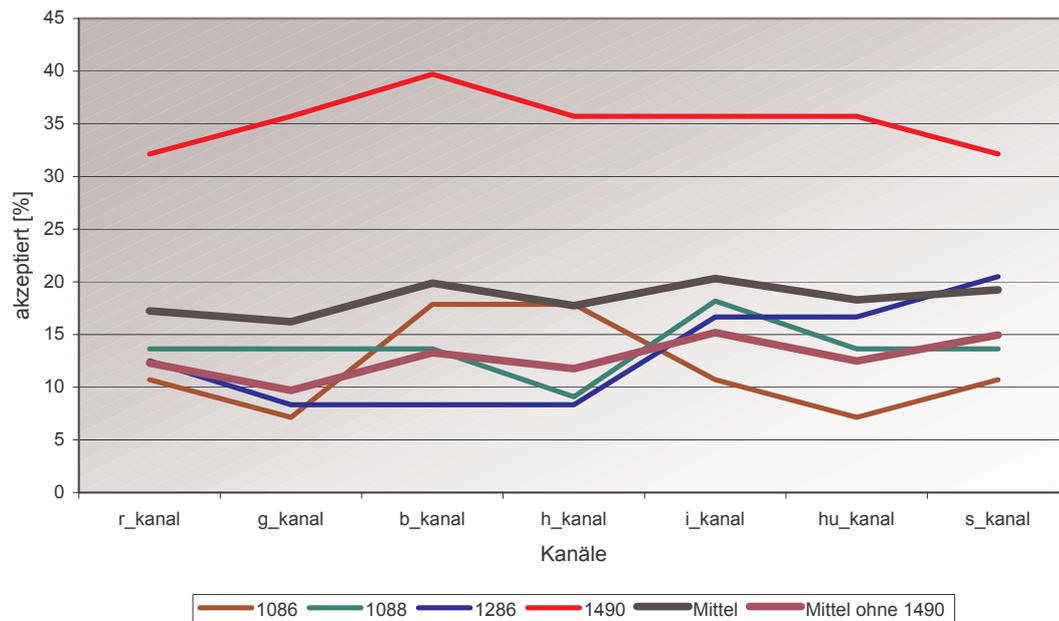


Abbildung 24: Verifikationsergebnis mit Baumreihen

In der Graphik ist zu erkennen, dass zwischen 7% und 40% akzeptiert wurde. Das ist ein großer Bereich, der durch die allgemein hohen Ergebnisse des Bildes 1490 zu begründen ist. Nimmt man diese aus, verringert sich der Rahmen der Ergebnisse auf einen Bereich zwischen 7% und 18%. Das ist repräsentativer, obwohl dies auf den tendenziellen Verlauf des Mittels, abgesehen von der absoluten Höhe, kaum Auswirkungen hat. Aus welchem Grund die Resultate in dem Bild 1490 so weit über dem Durchschnitt lagen, kann eventuell in der Grauwertanalyse geklärt werden. Die Resultate im allgemeinen liegen geringfügig unter den Erwartungen, da es sich nur um einen geringen Teil handelt, der akzeptiert wurde. Bei Betrachtung des Mittels bleibt festzustellen, dass die Ergebnisse als Gesamtes gesehen recht harmonisch sind. Der Unterschied zwischen dem besten Resultat, welches mit 16,2% akzeptierter Baumreihen im grünen Kanal erzielt wurde, und dem schlechtesten Ergebnis, welches mit 20,3% im Intensitätskanal erreicht wurde, betrug 4,1%, auf die sich die Resultate der weiteren fünf Kanäle aufteilten. Im Kanal Rot und

¹¹ [PELZER, 1980]



im Kanal der Hauptachse wurden ebenfalls gute Resultate erzielt. Die Ergebnisse wiederum, die in den verbleibenden Kanälen erzielt wurden, konnten dem allgemein erreichten Niveau der Verifikation nicht entsprechen.

Von Interesse waren jedoch die Gründe dafür, dass einige Baumreihen akzeptiert und andere verworfen wurden. Zur Klärung wurde jede Baumreihe nach dem Programmdurchlauf betrachtet und das Ergebnis analysiert. Dabei konnte festgestellt werden, dass bei der Linienextraktion ausnahmslos Strukturen gefunden wurden, aus denen allerdings auf Grund ihrer Lage und Ausrichtung nur selten Linien extrahiert werden konnten. Das ist in Abbildung 25 in der ersten Bildreihe dargestellt. Die zweite Bildreihe hingegen zeigt den für die Verifikation negativeren Teil, in dem die Baumreihe akzeptiert wurde.

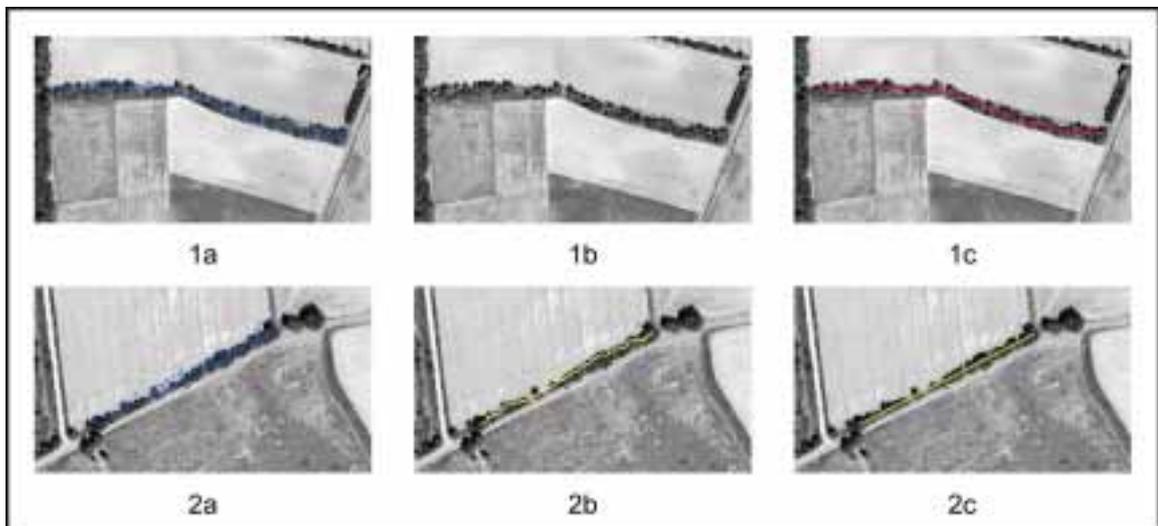


Abbildung 25: Fehlerhafte Verifikation von Baumreihen: a) Extraktion, b) Ergebnis der Verknüpfung, c) Bewertung (grün = akzeptiert, rot = verworfen), 1) Baumreihe verworfen, 2) Baumreihe akzeptiert

Im nächsten Schritt der Auswertung gilt es nun, die Baumreihen mit Hilfe der Grauwertprofile zu untersuchen. Dafür wurden diese zum einen quer zum Verlauf der Baumreihe gelegt und zum anderen entlang des Verlaufes. Die Verfahrensweise ist analog zu der in Kapitel 5.1.4 und wurde für die Kanäle Rot, Grün, Blau, der Hauptachse und der Intensitäten durchgeführt.

In einem ersten Schritt wurden die Grauwertprofile quer zum Verlauf der Baumreihe gelegt, was Abbildung 26 anhand eines Objektes darstellt. Es ist anhand des Verlaufes zu erkennen, dass dieses Objekt dunkler als seine Umgebung ist. Das unterscheidet sich vom Verlauf einer durchschnittlichen Straße, da diese heller ist als ihre Umgebung. Da es allerdings auch Straßen



oder Wege gibt, die dunkler als ihre Umgebung sind, wird das bei der Extraktion berücksichtigt.

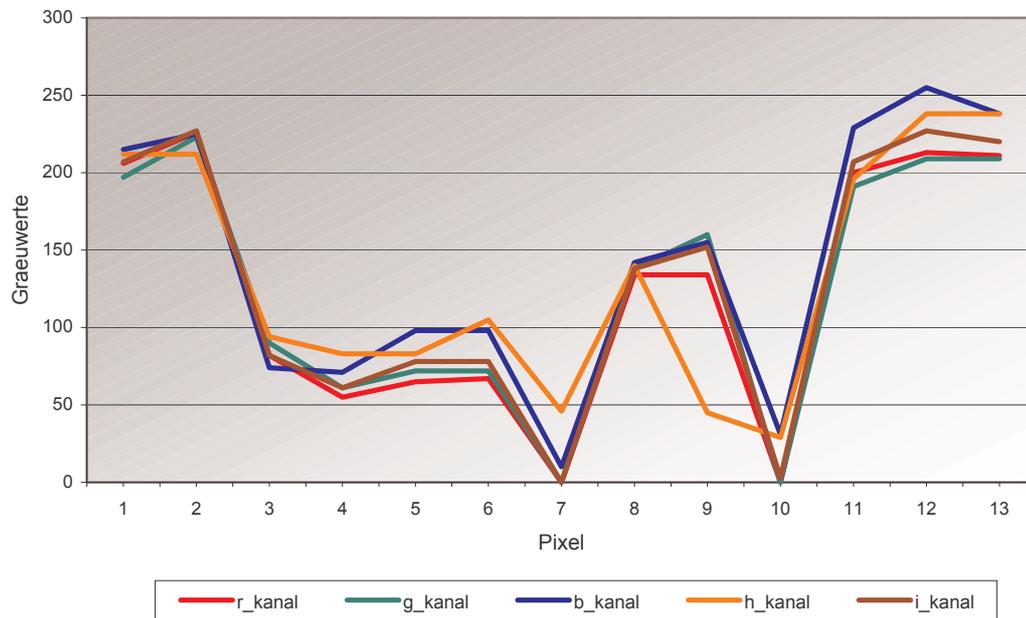


Abbildung 26: Grauwertprofil quer zum Verlauf der Baumreihe

Wie auch bei der Analyse der Straßen beobachtet wurde, ist ebenfalls bei den Untersuchungen der Baumreihen eine geometrische Abweichung im Kanal der ersten Hauptachse zu erkennen. Allgemein ist allerdings zu den Profilen zu ergänzen, dass der Verlauf nicht so homogen ist, wie er bei den Straßen beobachtet wurde. Im Diagramm 26 ist dies zu erkennen, da die Sohle zwischen den Grauwerten 0 und 160 springt. Genauere Aufschlüsse bezüglich der Homogenität wird die Untersuchung der Grauwerte entlang der Baumreihe bringen.

Diese wurde als nächstes mit den selben Baumreihen durchgeführt. Der Ablauf ist analog Kapitel 5.1.4 für die Grauwertanalyse in Richtung der Straße bereits geschildert. Hinzuzufügen ist jedoch, dass es sich bei den Untersuchungen schwieriger gestaltete, die Mitte der Baumreihen für die Lage des Grauwertprofils zu lokalisieren. Der Verlauf der Breite ist, bedingt durch verschieden breite Bäume und einen höhenbedingten Schattenwurf, äußerst inhomogen.

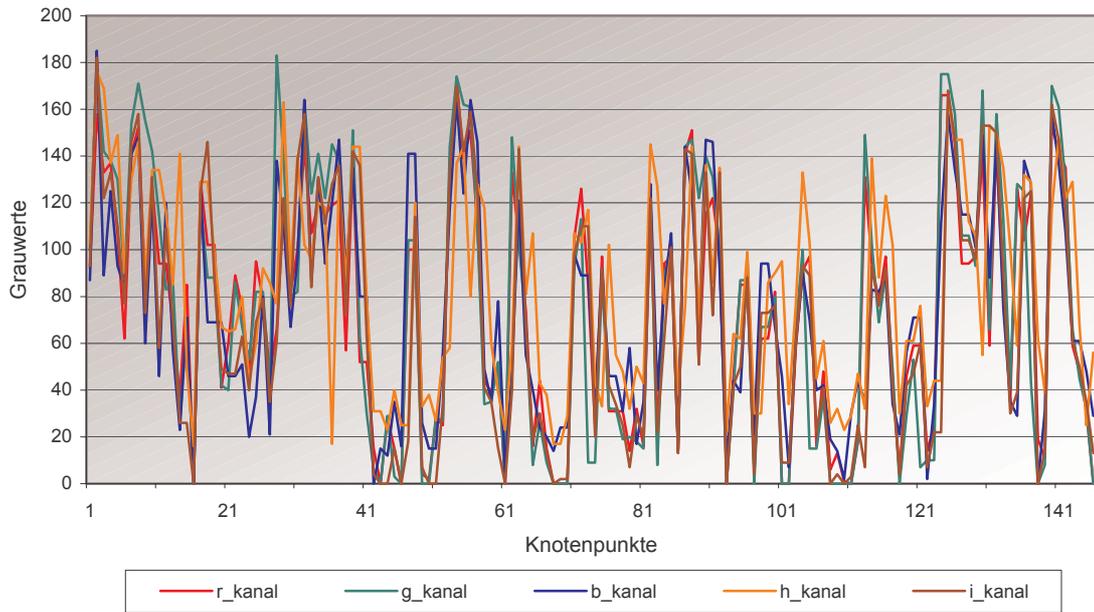


Abbildung 27: Grauwertverlauf in Richtung einer Baumreihe

Die Ergebnisse waren dafür um so aufschlussreicher. Darin konnte geklärt werden, aus welchem Grund unerwartet wenige Baumreihen akzeptiert wurden. Einen ersten Aufschluss gibt der Verlauf des Grauwertprofils in Richtung der Baumreihe, wie es in Abbildung 27 dargestellt ist. Bei der Betrachtung des Diagramms, im Vergleich zum Grauwertverlauf entlang einer Straße, wie es in Abbildung 19 dargestellt ist, fällt eine deutlich höhere Varianz der Grauwerte auf. Das bedeutet, dass der Grauwertunterschied zweier benachbarter Pixel wesentlich größer ist. Deutlicher zeigt das die Abbildung 28, in welcher der Grauwertunterschied zum vorangegangenen Pixel in Form eines Diagramms gezeigt wird.

Die Differenzen der Grauwerte benachbarter Pixel schwanken zwischen Werten von + 160 und von - 140. Die Schwankungen, wie sie in einer analogen Darstellung einer Straße in Abbildung 20 gezeigt werden, wiesen Extremwerte von lediglich ± 50 auf, die damit wesentlich geringer ausfielen. Das lässt die Vermutung zu, dass die starke Varianz der benachbarten Grauwerte für die geringeren Verifikationen verantwortlich ist.

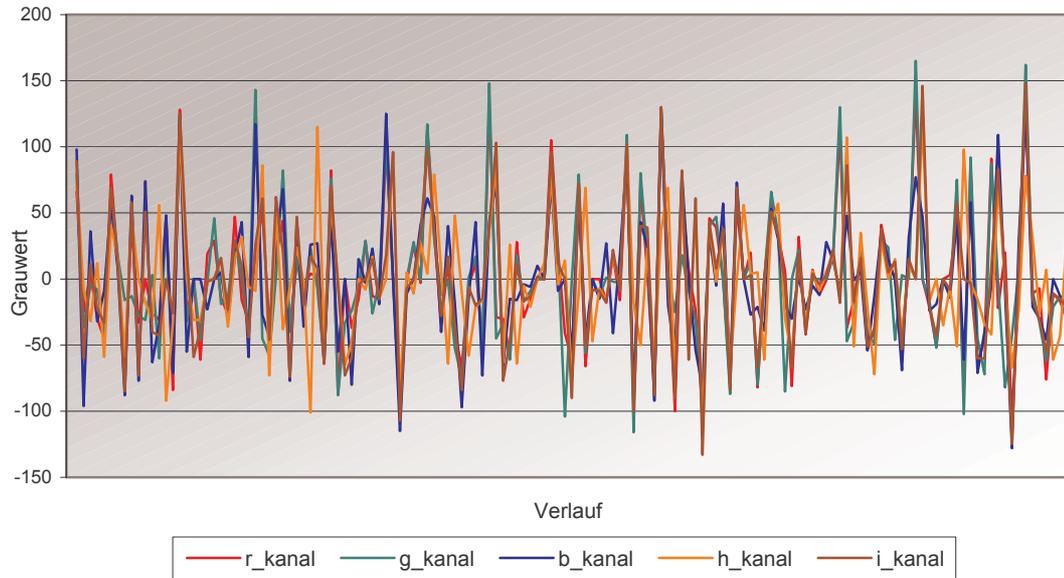


Abbildung 28: Grauwertdifferenz benachbarter Pixel

Um die Untersuchungen dahingehend abzuschließen, wurden die Grauwertunterschiede im Mittel bestimmt. Das gelang auch, da im Mittel über alle Kanäle und Bilder, der durchschnittliche Grauwertunterschied zweier Pixel 37,4 beträgt. Damit zeigt sich, dass die in den Steuerungsparametern festgelegte Hystereseschwelle der Grund für die größtenteils richtigen Ergebnisse in der Verifikation ist und damit ihre Aufgabe erfüllt. Obwohl dies geklärt ist, sind die kanalweisen Unterschiede von Interesse. In der folgenden Abbildung ist der durchschnittliche Grauwertunterschied zweier Pixel aus dem Grund kanalweise aufgeschlüsselt.

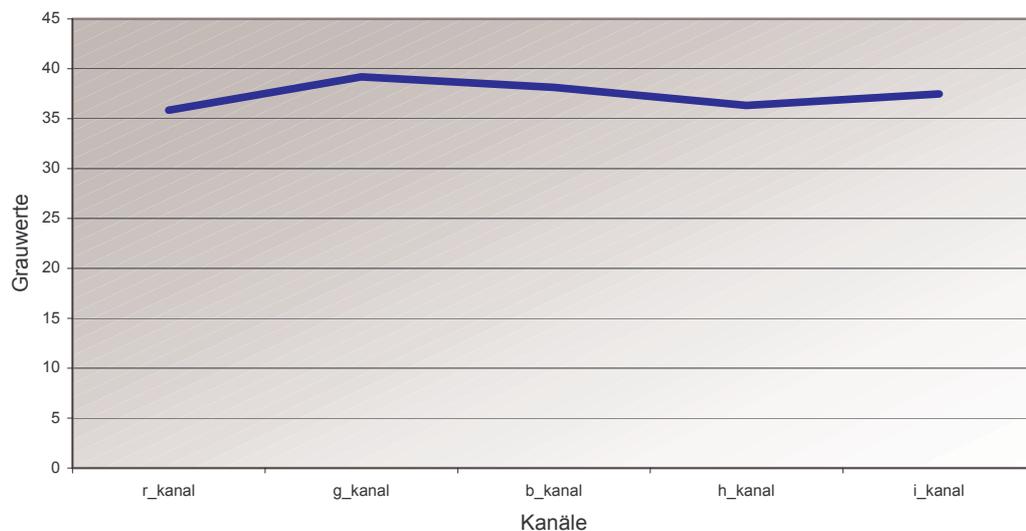


Abbildung 29: Grauwertunterschiede im Mittel



Das Diagramm 29 zeigt einen homogenen Verlauf über alle Kanäle. Diese weisen jedoch keine kanalspezifischen Spitzen auf. Aus dem Grund ist es nicht möglich, eine kanalweise Bewertung der Ergebnisse durch die Grauwertunterschiede zu treffen.

5.1.6 Die Ergebnis der Prozedur A

Eine Vielzahl von Tests und Untersuchungen waren notwendig, um die kanalspezifischen Unterschiede offen zu legen und die Eignung des jeweiligen Kanals zur Verifikation mit der Software Quala beurteilen zu können. Im folgenden Abschnitt sollen diese Ergebnisse übersichtlich und kanalweise geordnet zusammengefasst werden. Dabei wird die Reihenfolge beachtet, wie sie bisher angewandt wurde und somit mit dem Kanal Rot begonnen.

Die im roten Kanal erzielte Resultate konnten in der Gesamtheit der Untersuchungen nicht überzeugen. In der Regel wurden Resultate erzielt, die als schlecht anzusehen sind. Als Qualitätsmaß gilt die Determinante, da diese die Resultate der Verifikation mit korrekten und inkorrekten Eingangsdaten vereinigt. Der rote Kanal erzielte bei dieser Bewertung ein unterdurchschnittliches Ergebnis. Das lässt den Rückschluss zu, dass dieser Kanal für die Verifikationen nur bedingt geeignet ist. Die anschließende Analyse der kanalspezifischen Eigenschaften sollte dieses Ergebnis bestätigen. Es wurde festgestellt, dass der Kanal einen schlechten Kontrast besitzt, was für die Verifikation nachteilig ist. Positiv wiederum fiel die Untersuchung des Grauwertunterschiedes zweier Folgepixel aus. Dies ist auch vom Test der Verifikation mit Baumreihen als Eingangsdaten zu behaupten.

Die im grünen Kanal erzielten Ergebnisse sind denen des roten Kanals sehr ähnlich. Bei der Bewertung der Verifikation und Sensitivitätsanalyse, die durch die Determinante realisiert wird, lag das Resultat des grünen Kanals genau in der Mitte aller Probanden. Dadurch kann weder von einem guten noch von einem schlechten Ergebnis gesprochen werden. Das konnte von der Grauwertanalyse nicht behauptet werden. Dabei wurden im grünen Kanal unerwartet schlechte Resultate erzielt, welche das Ergebnis der vorangegangenen Verifikationen nicht bestätigten. Beim Verifikationstest mit Baumreihen hingegen, konnten im grünen Kanal die sichersten Resultate erzielt werden.



In der Betrachtung der Kanäle schließt sich nun der blaue Kanal an. Die Ergebnisse, die darin erzielt wurden, sind allerdings nicht überzeugend. Dies spiegeln die Resultate der Verifikationen mit richtigen und falschen Eingangsdaten, zusammengefasst in der Determinante, wieder. Darin erzielte der blaue Kanal die schlechteste Bewertung. Das zeigt allerdings nicht das Resultat der Grauwertanalyse, worin im blauen Kanal der beste Kontrast aufwies. Relativiert wurde das jedoch bei der Untersuchung der Grauwertunterschiede zweier benachbarter Pixel, in welcher im blauen Kanal eine ausgesprochen hohe Varianz der Grauwerte entlang der Straßen erkannt wurde. Damit erklären sich die ungenügenden Resultate der Verifikation, welche beim Test mit Baumreihen als Eingangsdaten erneut erzielt wurden.

Bei dem Kanal der ersten Hauptachse handelt es sich um einen künstlich erzeugten. Dieser fiel jedoch positiv auf. In der Bewertung der Verifikationen durch die Determinante erzielte dieser Kanal das beste Resultat. Den Untersuchungen folgte die der kanalspezifischen Eigenschaften. Es konnte festgestellt werden, dass der Kanal der ersten Hauptachse Schwächen in der geometrischen Genauigkeit aufwies. Es wurde festgestellt, dass sich die Lage der Objekte im Zuge der Erzeugung um ein bis zwei Pixel verschieben kann. Die Grauwertanalysen an sich weisen dem Kanal dennoch keine gute Qualität aus, da der Kontrast schlecht ist. Bei der Untersuchung des Verifikationsverhaltens auf Baumreihen lag das Ergebnis im annehmbaren Bereich.

Eine gute Bewertung durch die Determinante ohne das Manko der Ungenauigkeit bietet der Kanal der Intensitäten. Es erzielte nur der Kanal der Hauptachse ein besseres Ergebnis. Der Unterschied der beiden ist dabei jedoch minimal. Im Kanal der Intensitäten wurden bei der Verifikation mit richtigen Eingangsdaten zwar schlechtere Resultate erzielt, dieses Defizit konnte jedoch durch eine sichere Extraktion in der Sensitivitätsanalyse wieder ausgeglichen werden. Ebenfalls gute Resultate wurden in diesem Kanal bei der Untersuchung der kanalspezifischen Eigenschaften erzielt. Sowohl der Kontrast als auch der Grauwertunterschied benachbarter Pixel begünstigen eine Verifikation. Nur die Baumreihen wiesen sich für diesen Kanal als Fehlerquelle aus, da diese beim Test nicht ausreichend als Fehler erkannt wurden.

In der Betrachtung folgt nun der Kanal des Farbtons. Für diesen, genau wie für den Kanal der Sättigungen, steht zur Beurteilung einzig die Determinante und die Verifikation mit Baumreihen zur Verfügung. Das ist der Fall, da die Analysen der kanalspezifischen Unterschiede exemplarisch für eine Auswahl an Probanden durchgeführt wurde. Die Bewertung des Kanals des Farbtons durch



die Determinante lag im unteren Drittel. Das bedeutet, dass in diesem Kanal unterdurchschnittliche Ergebnisse erreicht wurden. Dies gilt auch für die mit Baumreihen durchgeführte Verifikation.

Die Ergebnisse, die im Kanal der Sättigungen erzielt wurden, glichen in der Verteilung sehr dem Kanal des Farbtons. Die Determinante wies dem Kanal, im Vergleich zu den anderen Kanälen, kein positives Verifikationsverhalten aus. Dies ist ebenfalls von der Verifikation mit Baumreihen zu behaupten. Das lässt letztlich den Schluss zu, dass der Kanal keine optimalen Rahmenbedingungen zur Verifikation von Straßen liefert.

5.2 Die Untersuchungen der Prozedur B

Aufbauend auf den Untersuchungen des Kapitels 5.1, in welchem die Kanäle hinsichtlich ihrer Eignung zur Verifikation untersucht wurden, gilt es nun, die Parameter zur Steuerung der Verifikation den kanalspezifischen Unterschieden anzupassen. Damit erhofft man sich eine Steigerung der Qualität der Verifikation.

5.2.1 Die Untersuchungen der Parameter

Um dieses Ziel zu realisieren, wurde in einem ersten Schritt der bestehende Parametersatz bezüglich seines Aufbaues analysiert. Dieser besteht aus sechs Modulen, die jeweils einer Routine der Verifikation angehören. Auf Grund der in Kapitel 2 erläuterten Modellierung wurden die einzelnen Parameter ausgewählt, wobei sowohl geometrische als auch radiometrische Eigenschaften berücksichtigt wurden. Da es in der Betrachtung einzig um die spektralen Unterschiede des Bildmaterials geht, können die geometrischen Parameter von der Untersuchung ausgeklammert werden. Damit müssen im Weiteren ausnahmslos die radiometrischen Parameter betrachtet werden, wobei es sich um vier Stück handelt, die anzupassen sind. Diese sind auf zwei Module verteilt. Die Parameter *contrast_high*, *contrast_low* und *threshold* befinden sich zusammen im ersten Modul, *extrLines*, in welchem die Linienextraktion stattfindet. In dem dritten Modul der Verifikation, *assessLines*, in dem die Qualitätsbewertung des Verifikationsergebnisses durchgeführt wird, befindet sich der Parameter *grey_dev*.



Der Parameter *contrast_high* gibt dabei den oberen Hystereseschwellwert an, der die Grauwertdifferenz zwischen dem Startpunkt der Linienpixelkette und der Umgebung, die mindestens gegeben sein muss, begrenzt. Bisher ist der Wert auf eine Differenz von vierzig Grauwerten eingestellt. Bei dem Parameter *contrast_high* wurde sich dafür entschieden, den Schwellwert höher zu setzen, was die Verifikation sicherer gestaltet. Zum Festlegen des Wertebereiches, in welchem getestet wird, wurde auf die Grauwertanalysen der Kanäle aus Kapitel 5.1.4 aufgebaut. In denen wurden die Kontrastverhältnisse der einzelnen Kanäle untersucht. Es wurde festgestellt, dass der Grauwertunterschied zwischen der Straße und der Umgebung durchschnittlich höher liegt. Darauf Bezug nehmend wurde die obere Hystereseschwelle schrittweise von 40 auf einen Wert von 65 erhöht. Dies geschah in Schritten von jeweils fünf Grauwerten, wobei alle weiteren Parameter unberührt blieben. Dabei wurde das Verifikationsverhalten in zwei repräsentativen Bildern beobachtet und erwartungsgemäß festgestellt, dass die Menge akzeptierter Straßen mit zunehmender Erhöhung des Hystereseschwellwertes abnahmen. Das ist anschaulich in Abbildung 30 dargestellt, in der die Mittelwerte der Verifikationen in den beiden Testbildern bei Veränderung des Hystereseschwellwertes mittels eines Diagramms gezeigt werden.

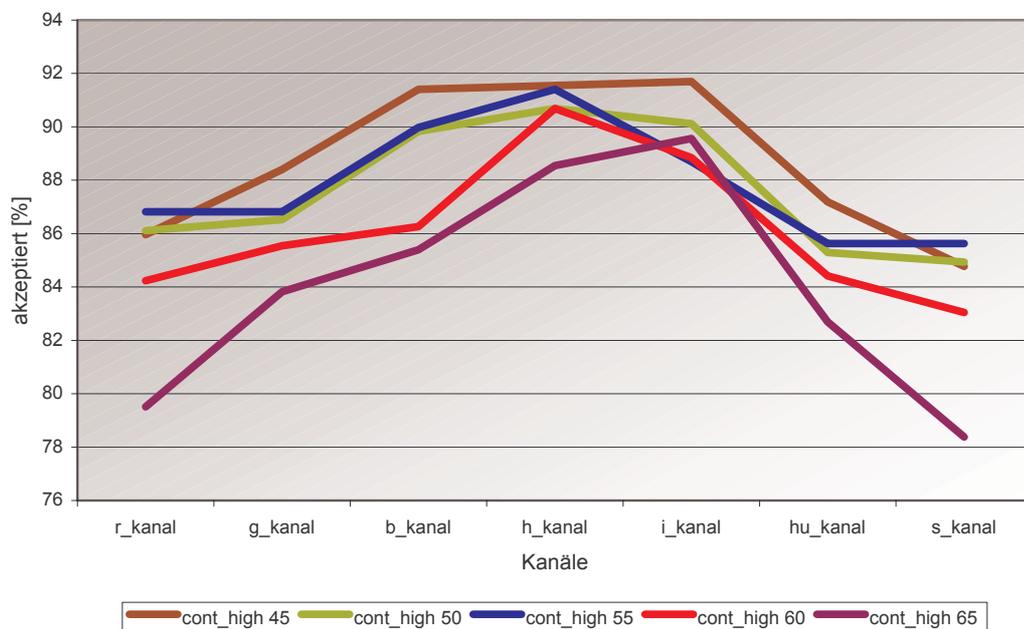


Abbildung 30: Verifikationsergebnis mit korrekten Eingangsdaten bei Veränderung des Parameters *contrast_high*



Es ist des Weiteren in der Abbildung ein systematischer Anstieg der Ergebnisse vom roten Kanal zum Intensitätskanal zu erkennen. Das deckt sich mit der Untersuchung des Kontrastes, der einen ähnlichen Anstieg aufwies. Das hier dargestellte Verifikationsergebnis wurde mit positiven Eingangsdaten erzielt. Die Untersuchungen der Parameter wurden sowohl mit korrekten als auch mit inkorrekten Eingangsdaten durchgeführt, um die Zuverlässigkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Das ist in Abbildung 31 als Diagramm dargestellt.

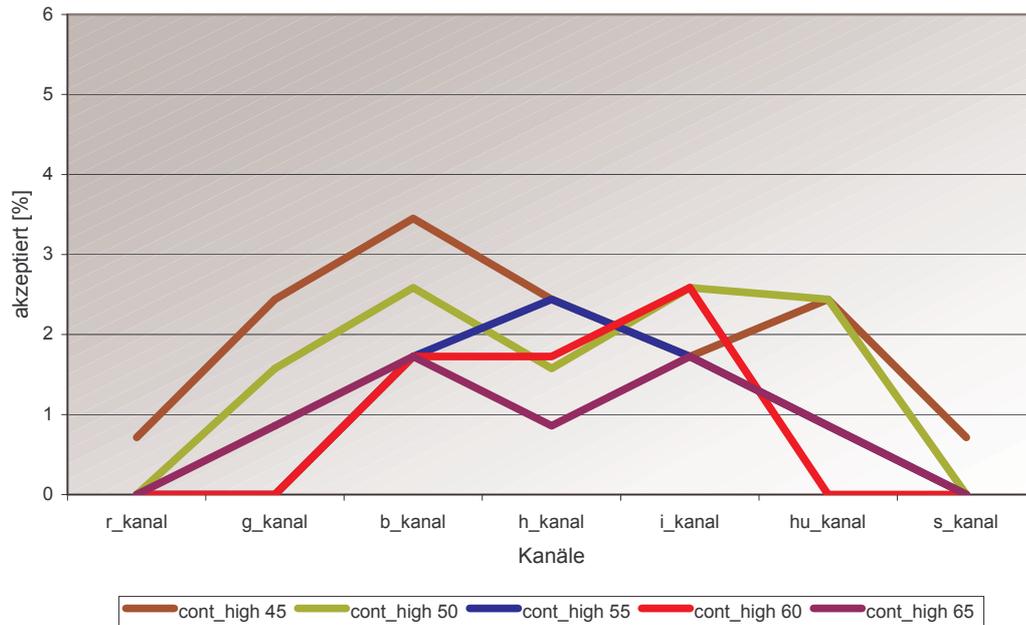


Abbildung 31: Verifikationsergebnis mit inkorrekten Eingangsdaten bei Veränderung des Parameters contrast_high

Die Resultate der Verifikation mit negativen Eingangsdaten der Abbildung 13 aus Kapitel 5.1.2 glichen den dargestellten in ihrem Verlauf. Betrachtet man jedoch kanalweise nur die Resultate mit den geringsten Annahmen, so ist zu erkennen, dass sich der Wertebereich auf ein Niveau zwischen 0% und 1% senkte. Was in der Sensitivitätsanalyse allerdings auffiel, ist ein generell sehr sicheres Ergebnis des roten Kanals und des Sättigungskanals, mit fast jeder Parametereinstellung. Um allerdings Aussagen über die Eignung der einzelnen Parameter treffen zu können, müssen die beiden Verifikationsergebnisse verschmolzen werden. Das geschah in der Determinante und ist in der Graphik 32 abgebildet.

Hierin wird ebenfalls die Abstufung mit zunehmender Höhe des Parameters contrast_high deutlich. Des Weiteren fällt auf, dass im Vergleich zum Verlauf der Determinanten mit festgesetzten Parametern, wie in Abbildung 16



dargestellt, im blauen Kanal deutlich höhere Resultate erzielt werden konnten. Das ist mit den guten Kontrastverhältnissen des Kanals zu erklären. Damit wurde eine geringfügige Verbesserung der Ergebnisse durch die Anpassung der Parameter erzielt, was einzig auf die Senkung der 'false positives' zurückzuführen ist.

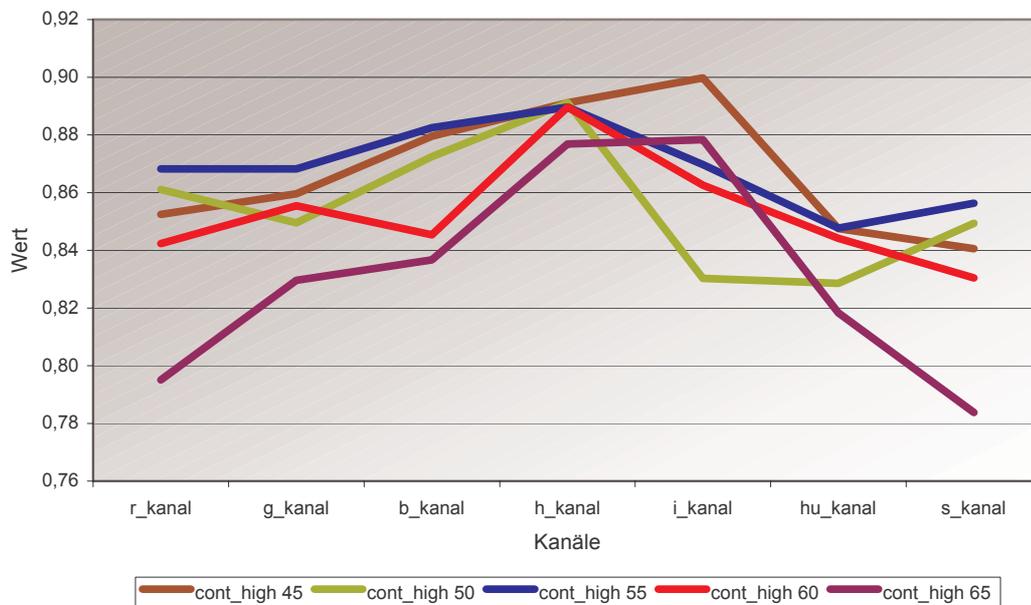


Abbildung 32: Determinante contrast_high

Ein weiteres Ziel war es, Parameter für die folgenden Untersuchungen ausschließen zu können. Das ist nötig, da nach Beendigung der Betrachtung einzelner Parameter, alle kombiniert werden sollen und die Summe der Kombinationsmöglichkeiten schnell ansteigt. Diese berechnet sich nach der Formel k^n , wobei k die Anzahl der Abstufungen in der Untersuchung ist und n die Anzahl der Parameter, die kombiniert werden sollen. Es wird deutlich, dass sich die Verknüpfungsmöglichkeiten potenzieren. Auf Grund dessen wurden von den weiteren Untersuchungen die Parameter in Höhe von 60 und 65 ausgeschlossen. Es ist im Diagramm 32 zu erkennen, dass die beiden Werte keinen positiven Einfluss auf die Ergebnisse haben.

In den Untersuchungen folgt nun die Betrachtung des Parameters *contrast_low*, welcher den unteren Hystereseschwellwert festlegt. Dieser bestimmt den maximalen Grauwertunterschied, den zwei aufeinanderfolgende Linienpixel besitzen dürfen, um verbunden zu werden. Im Ausgangsparametersatz ist der *contrast_low* mit einem Wert von 5 ausgewiesen. Bei der Festlegung des Testbereiches wurde sich wieder auf die Ergebnisse der spektralen Analyse der



Kanäle in Kapitel 5.1.4 gestützt. Darin ist speziell der Grauwertunterschied zweier benachbarter Pixel im Verlauf der Straße untersucht worden. Es zeigte sich, dass der durchschnittliche Grauwertunterschied 15,75 Grauwerte beträgt. Kanalweise staffeln sich die Ergebnisse in einem Bereich zwischen 12,73 und 19,53 Grauwerten. Das bedeutet für den Parameter *contrast_low*, dass der Wertebereich der Untersuchungen auf die Werte 10, 15 und 20 ausgedehnt wird. Die weiteren Parameter wurden dabei auf den Grundeinstellungen belassen, um einzig den Einfluss des *contrast_low* zu erkennen. Es wurde erneut an zwei repräsentativen Bildern die Auswirkung dieser Veränderung getestet. Die Verifikationen wurden anschließend mit korrekten und inkorrekten Eingangsdaten durchgeführt. Dabei konnte allerdings kein systematischer Verlauf erkannt werden, wie Abbildung 33 zeigt.

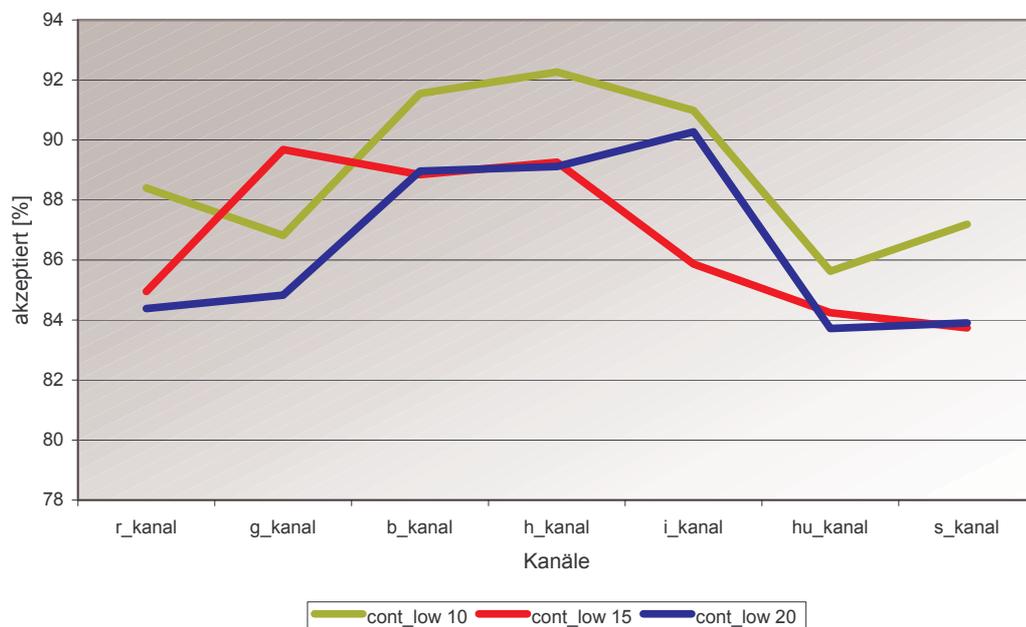


Abbildung 33: Verifikationsergebnis mit korrekten Eingangsdaten bei Veränderung des Parameters *contrast_low*

Es ist erneut ein außerordentlich positiver Effekt auf den blauen Kanal zu erkennen. Ähnliches trifft auch auf den Kanal der ersten Hauptachse zu. Gesamt betrachtet sind die Ergebnisse jedoch durchsetzt, da die Parameter, welche kanalweise Maxima aufweisen, variieren. Anschließend wurde die Verifikation mit inkorrekten Eingangsdaten durchgeführt, was in Abbildung 34 dargestellt ist.

In der Verifikation mit negativen Eingangsdaten überraschten vor allem die Resultate, welche im roten Kanal und im Sättigungskanal erzielt werden



konnten, da in diesen keine fehlerhafte Straße akzeptiert wurde. Ansonsten fiel der Kanal der Hauptachse negativ auf, in dem alle Ergebnisse ihre Maxima an Akzeptanz aufwiesen.

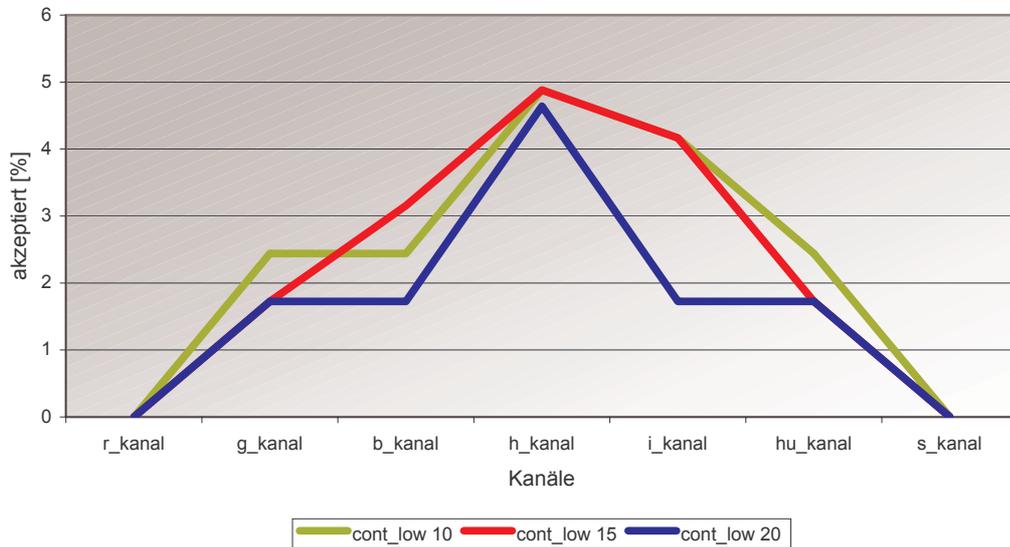


Abbildung 34: Verifikationsergebnis mit inkorrekten Eingangsdaten bei Veränderung des Parameters *contrast_low*

Im Vergleich zu den Ergebnissen, die mit festgesetztem Parametersatz erzielt wurden und in Abbildung 13 dargestellt sind, ist allerdings ein enormer Unterschied im allgemeinen Verlauf zu erkennen. Bewertet wird das jedoch erst, wenn die Resultate der Verifikationen mit korrekten und inkorrekten Eingangsdaten fusioniert werden. Dies ist in Abbildung 35 in Form eines Diagramms dargestellt.

Darin ist im Verlauf der Kurven keine Systematik zu erkennen. Mit jedem der getesteten Parameter wird ein Maximum in einem Kanal erreicht, was die Notwendigkeit kanalspezifischer Steuerungsparameter verdeutlicht. Aus dem Wertebereich der Untersuchung kann allerdings auf Grund dessen kein Wert für den Parameter *contrast_low* gestrichen werden. Das stellt jedoch kein Problem dar, da die Anzahl der verschiedenen Einstellungen übersichtlich ist. Zum Ergebnis ist zu ergänzen, dass im blauen Kanal erneut die sichersten Resultate erzielt werden konnten. Es scheint, als könne das Defizit dieses Kanals, welches nach Betrachtung der Prozedur A vermutet wurde, durch eine angepasste Parameterwahl negiert werden. Die Ergebnisse der anderen Kanäle bewegen sich im Rahmen der Verifikation mit den festgesetzten Parametern.

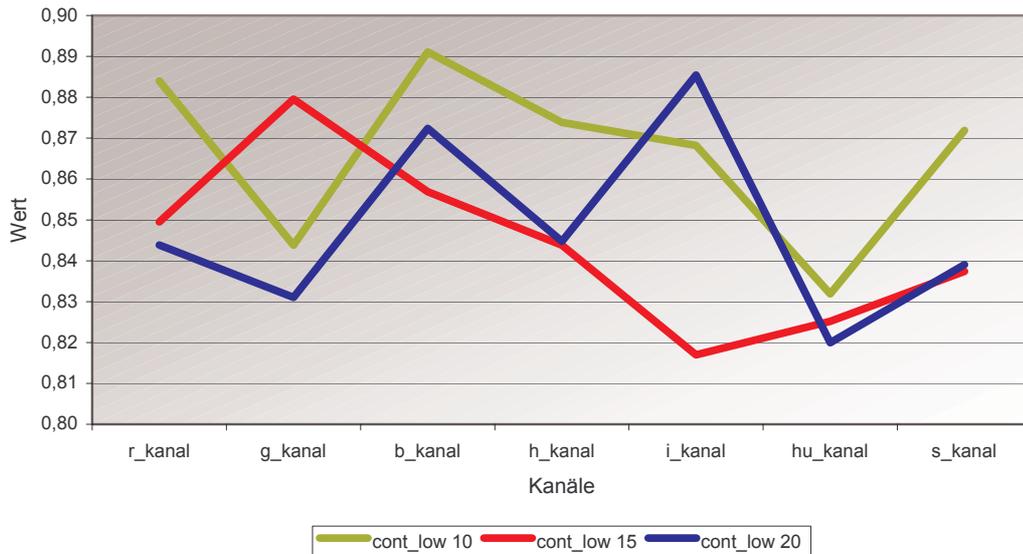


Abbildung 35: Determinanten contrast_low

Die Analyse des Parameters *threshold* schließt sich nunmehr an. Der Parameter legt den Schwellwert für eine Ausmaskierung fest. Es handelt sich dabei um eine Möglichkeit zur Steuerung, die in der reinen Straßenextraktion Sinn macht. In der Verifikation, wie sie hier durchgeführt wird, findet dies jedoch keine Anwendung. Aus dem Grund kann von einer Untersuchung des Parameters *threshold* abgesehen werden.

Der Parameter *grey_dev* beinhaltet die minimale und die maximale Abweichung vom Mittelwert der Grauwerte. Dieser besitzt allerdings eine geringe Kanalabhängigkeit, da sich der berechnete Mittelwert individuell auf das Eingangsbildmaterial bezieht. Aus dem Grund wurden keine Untersuchungen bezüglich des Parameters durchgeführt.

5.2.2 Die Verknüpfung vorläufiger Parameter

Da die Parameter, welche zu untersuchen sind, ausgewählt wurden und erste Ergebnisse bezüglich der Werte vorliegen, gilt es nun diese zu verknüpfen. Dafür wurden für den Parameter *contrast_high* die Werte 45, 50 und 55 und für den Parameter *contrast_low* die Werte 10, 15 und 20 ausgewählt. Damit stehen der Untersuchung neun Parameterkombinationen zur Verfügung. Um den Test stabiler gegenüber zufälliger Fehler zu gestalten, fand die folgende Untersuchung in vier Bildern statt. Damit sind die Ergebnisse aussagefähiger



und repräsentativer für die gesamte Testreihe. Die Verifikation wurde gestartet und lief kanal- und bildweise für jede Parameterkombination sowohl mit korrekten als auch mit inkorrekten Eingangsdaten im Batch ab.

Als Ergebnis wurde die Determinante berechnet, die eine Auswertung wesentlich vereinfachen sollte. Es wurde ein Diagramm erzeugt, welches das zusammenfasst. Das ist in Abbildung 36 gezeigt. In der Legende ist die Kombination der Parameter dargestellt. Darin steht die erste Zahl für den Wert des Parameters *contrast_low*, der zweite Wert steht für den Parameter *contrast_high*.

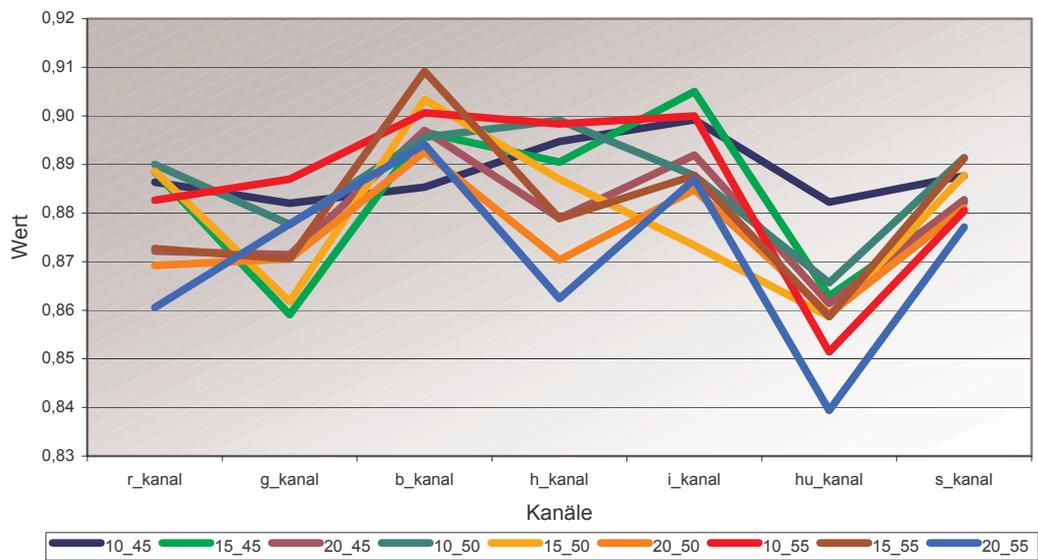


Abbildung 36: Determinanten der Parameterkombinationen

Eine günstigste Kombination dieser Parameter ist an dem besten Resultat im Diagramm zu erkennen. Dabei ergaben sich für die Kanäle die in Tabelle 9 dargestellten Parameterkombinationen.

Kanal\ Parameter	contrast_low	contrast_high
r_Kanal	10	50
g_Kanal	10	55
b_Kanal	15	55
h_Kanal	10	50
i_Kanal	15	45
hu_Kanal	10	45
s_Kanal	10	50

Tabelle 9: vorläufige kanalweise Parameterkombinationen



Wenn die ausgewählten Parameterkombinationen für jeden Kanal isoliert werden und den Resultaten mit alten Parametern gegenüber gestellt werden, ergibt sich das Diagramm, welches in Abbildung 37 dargestellt wird.

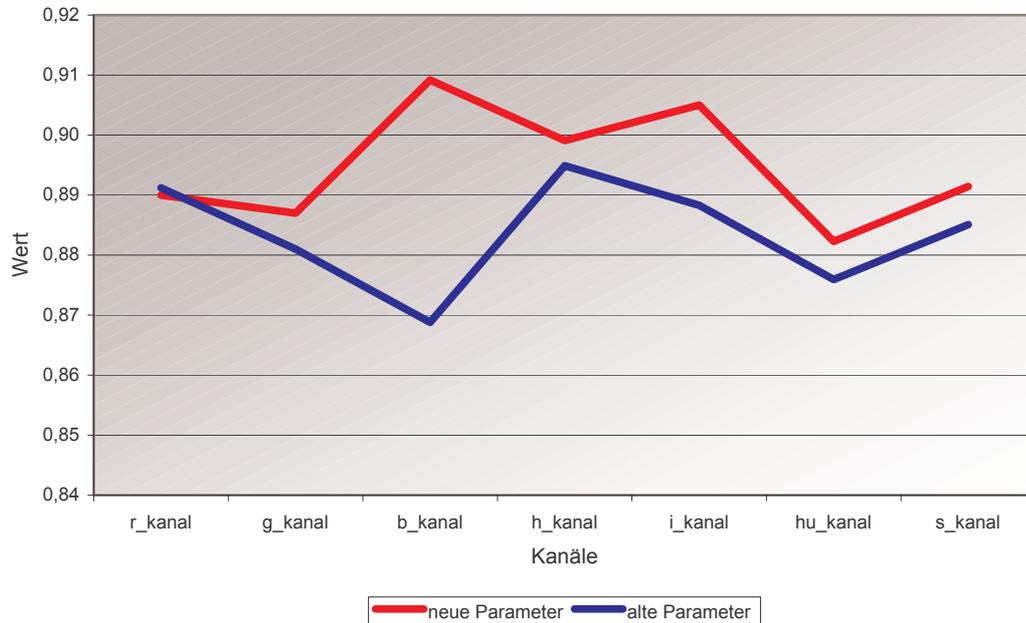


Abbildung 37: Gegenüberstellung der Determinanten mit alten und vorläufig neuen Parametern

Die Darstellung zeigt, dass in den Testbildern mit den neuen Parametern eine Verbesserung der Ergebnisse erzielt werden konnte. Auszunehmen ist allerdings die Bewertung des roten Kanals, die keine Steigerung erfuhr. Im Gegenzug wird auch das Potential deutlich, welches bei der richtigen Parameterwahl im blauen Kanal liegt. In diesem wurde die größte Verbesserung erreicht.

Mit den Ergebnissen kann nun gezielt die Verifikation in der gesamten Testreihe durchgeführt werden. Es wird sich davon erhofft, die gerade erzielten Ergebnisse übertragen zu können und damit die Verifikation insgesamt zu verbessern. Die Resultate dessen sind in der Abbildung 38 dargestellt. Darin sind die Ergebnisse, die mit den alten Parametern erzielt wurden, in blau und die Resultate, welche mit den in Tabelle 9 gezeigten Parametern erzielt wurden, in rot dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Verlauf der Kurven im Vergleich zur Abbildung 37 differiert. Mit den Parametern des grünen Kanals und den Parametern des Kanals der Intensitäten wurde keine Verbesserung der Ergebnisse erzielt. In dem Kanal Rot und dem der ersten Hauptachse sowie im Kanal des Farbtons und der Sättigung konnte eine Steigerung erreicht werden.



Der größte Effekt auf die Resultate der Verifikation wurde im blauen Kanal erzielt.

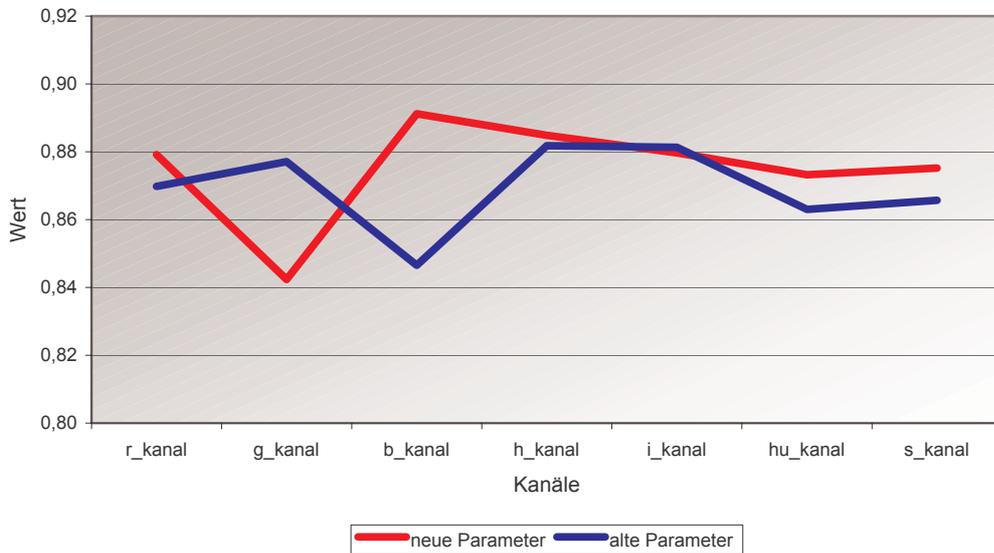


Abbildung 38: Determinanten mit alten und neuen Parametern

Die Verbesserungen sind in der Abbildung 39, aufgeschlüsselt nach den jeweiligen Resultaten der Verifikation mit korrekten und inkorrekten Eingangsdaten, abgebildet.

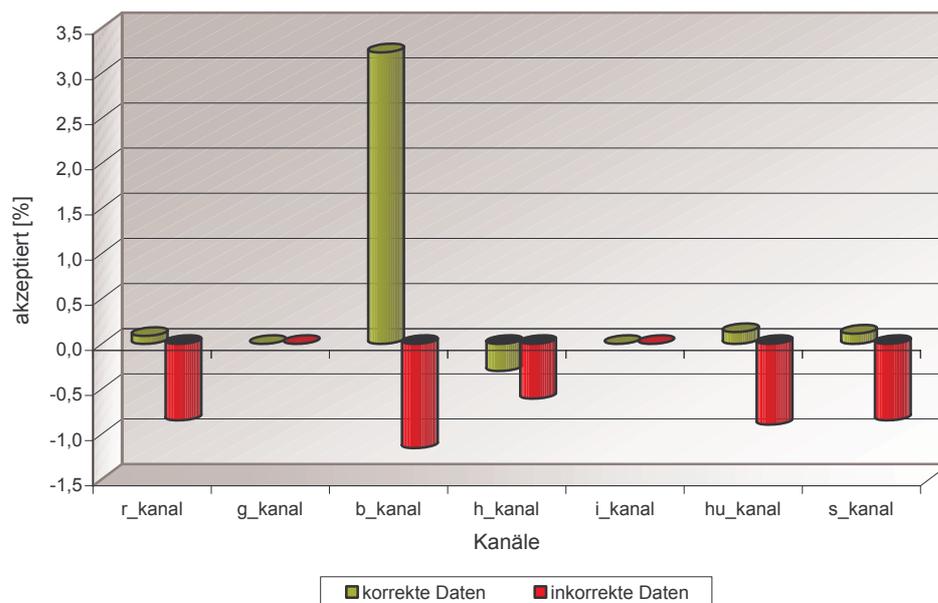


Abbildung 39: Verbesserungen der Verifikation mit positiven und negativen Eingangsdaten



Da im Kanal Grün und dem Kanal der Intensitäten keine Verbesserung erreicht wurden, erscheinen die neuen Parameter nicht praktikabel, weswegen sie nicht übernommen werden. Damit wird in den beiden Kanälen auf die ursprünglichen Parameter zurückgegriffen. Die endgültigen kanalangepassten Parameter zur Steuerung der Software Quala, wie sie empfohlen werden, sind in Tabelle 10 dargestellt. Dabei fiel auf, dass sich die Parameterkombination 10-50 (*contrast_low-contrast_high*) sowohl im roten Kanal, im Kanal der Hauptachse als auch im Kanal der Sättigung durchsetzte.

Kanal\ Parameter	contrast_low	contrast_high
r_Kanal	10	50
g_Kanal	5	40
b_Kanal	15	55
h_Kanal	10	50
i_Kanal	5	40
hu_Kanal	10	45
s_Kanal	10	50

Tabelle 10: empfohlene kanalweise Parameterkombinationen

5.2.3 Die Überprüfung angepasster Parameter an Baumreihen

Nachdem angepasste Parameter festgelegt wurden, ist abschließend das neue Verifikationsverhalten auf Baumreihen zu bewerten. Sollte sich dies auf Grund der angepassten Parameter sehr negativ auswirken, ist die Steuerung neu zu überarbeiten. Um das herauszufinden, wurde die Verifikation analog Kapitel 5.1.5, mit Baumreihen durchgeführt. In Abbildung 40 ist das Resultat dessen dargestellt. Um dies anschaulicher und vergleichbarer zu gestalten, wurde das Ergebnis, welches in Kapitel 5.1.5 erzielt wurde, ebenfalls abgebildet.

Das Resultat, wie es darin erzielt wurde, überraschte in seinem Verlauf, da vermutet wurde, dass die extraktionsfreudigeren Parameter zu einer Steigerung der Akzeptanz von Baumreihen führen. Was nicht erwartet wurde, ist jedoch eine Senkung der Akzeptanz, wie es im Kanal Blau und im Sättigungskanal statt fand. Zu einer Erhöhung der Resultate kam es einzig in dem Kanal der ersten Hauptachse und im roten Kanal. Diese liegen in der Größenordnung von etwa einem Prozent und ist damit nicht akut.

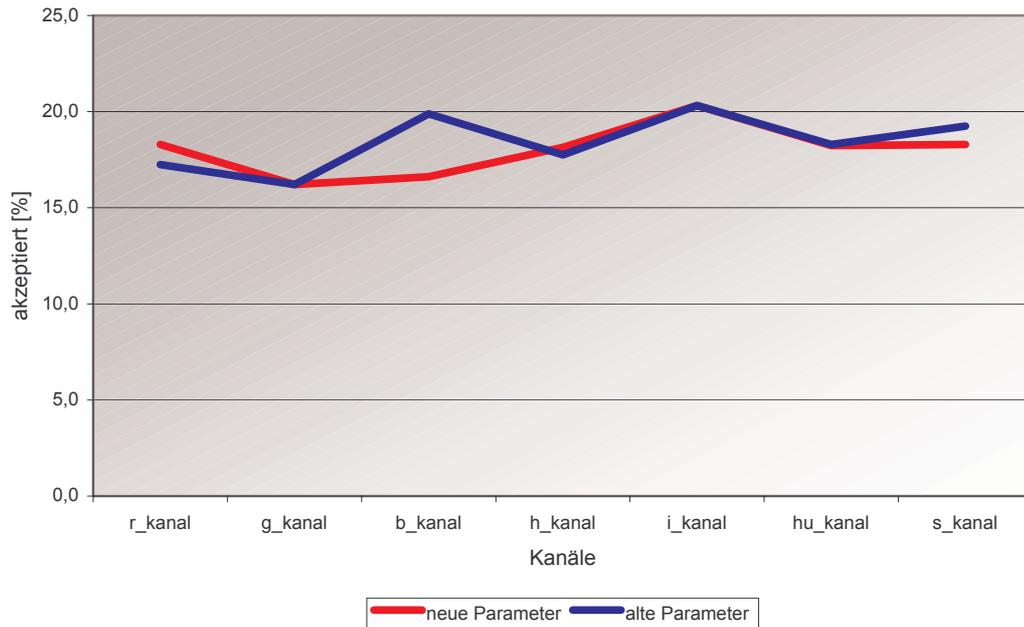


Abbildung 40: Vergleich neuer und alter Parameter bei Baumreihen

5.2.4 Die Zusammenfassung der Prozedur B

Damit kann festgestellt werden, dass sich die angepassten Parameter, wie sie in diesem Kapitel erstellt wurden, bewährten. Auf Grund der teilweisen Verbesserung der Ergebnisse mit angepassten Parametern zur Steuerung, muss die Bewertung der Kanäle jedoch überarbeitet werden. Im blauen Kanal konnten die Verifikationen mit korrekten Eingangsdaten um 3,2% im Mittel erhöht werden. In der Sensitivitätsanalyse mit inkorrekten Eingangsdaten wurde das Resultat ebenfalls um 1,2% verbessert. Das bedeutet für den Vergleich der Verifikationsergebnisse aller Kanäle, dass im blauen Kanal nun das beste Resultat erzielt wurde. Deutlich wird der Unterschied in den Ergebnissen bei Betrachtung der Abbildung 41, in der das gleiche Bild nach den Verifikationen mit den angepassten und den ehemaligen Parametern dargestellt ist. Die grünen Straßen wurden darin akzeptiert und die roten verworfen. Speziell in diesem Bild beträgt der Unterschied zwischen den beiden Verifikationen 8,7%, die mit den neuen Parametern zusätzlich akzeptiert werden konnten. Des Weiteren wird deutlich, dass durch die neuen Parameter nicht einfach mehr sondern andere Straßen akzeptiert werden. Das führt unter anderem dazu, dass Straßen, die mit den alten Parametern angenommen wurden, nun verworfen werden.

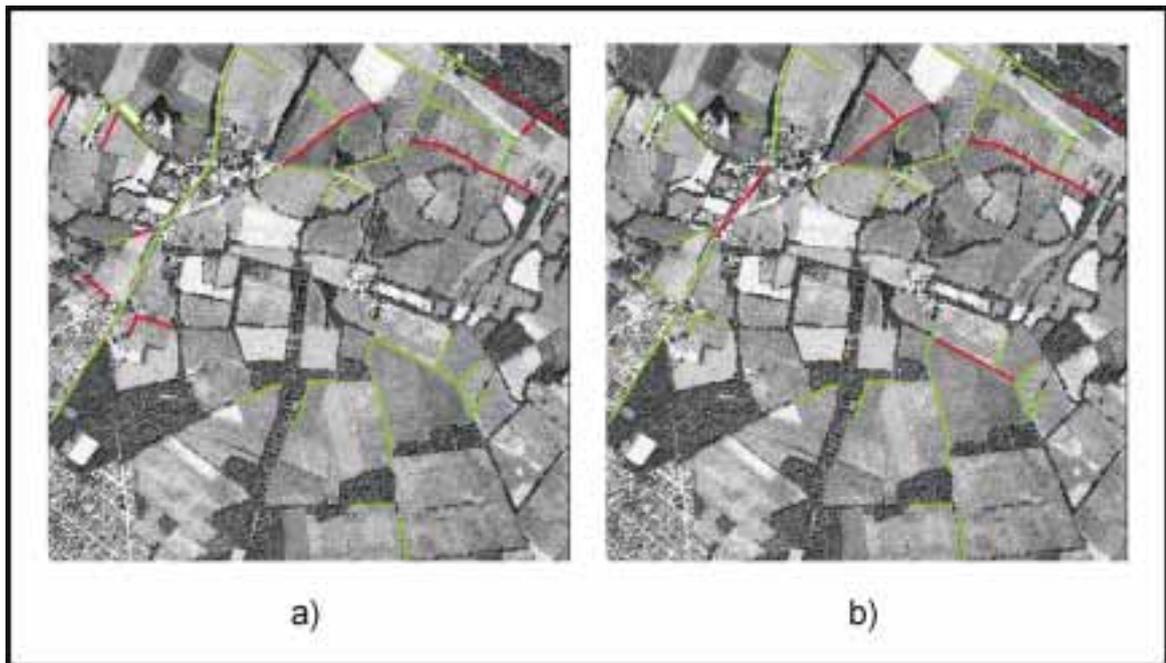


Abbildung 41: Verifikationsergebnisse mit a) festgesetzten und b) angepassten Parametern

In der Bewertung folgt der Kanal der ersten Hauptachse, dessen Resultate trotz der guten Ergebnisse im Vorfeld dennoch verbessert werden konnten. In der Verifikation mit korrekten Eingangsdaten fiel die Verbesserung zwar gering aus, dafür gelang eine Steigerung der Sicherheit, welche in der Sensitivitätsanalyse erzielt wurde. Der Kanal der Intensitäten schließt in der Bewertung an, obwohl die Parameter nicht verändert wurden. Im roten Kanal konnte zwar durch die Anpassung der Parameter eine Besserung erzielt werden, welche sich allerdings nicht auf die Plazierung auswirkte. Den größten Einfluss hatte die Veränderung der Steuerung in dem Kanal auf die Sensitivitätsanalyse. Darin gelang es, das Ergebnis des Kanals um etwa ein Prozent zu verbessern. Diese Steigerung um ca. ein Prozent gelang auch in dem Kanal der Sättigung und des Farbtons. Auf die Plazierung hatte dies jedoch auch hier keinen Einfluss. Das schlechteste Resultat erzielte der grüne Kanal, trotz Beibehalt der Parameter zur Steuerung. In diesem Kanal ist die Differenz zwischen den Resultaten mit festgesetzten und veränderten Parametern enorm. Dennoch führte das nicht zu einer Verbesserung. Das irritierte an der Stelle, da der Kanal bei der Untersuchung mittels der Grauwertprofile durchschnittliche Ergebnisse erzielte und auch an keiner anderen Stelle der Analysen negativ auffiel.

Die ausführlichen Parameter zur Steuerung der Verifikation, mit allen Modulen und den kanalweisen Anpassungen sind im Anhang A.2 bis A.5 aufgeführt.



6. Untersuchungen im Datensatz Hessen mit Vergleich zum Datensatz Nordrhein-Westfalen

Das Kapitel 5 beinhaltet Untersuchungen und Analysen der verschiedenen Kanäle im Datensatz Nordrhein-Westfalen. Die Ergebnisse dessen werden im folgenden Kapitel im Datensatz Hessen getestet und dadurch in ihrer Aussagefähigkeit auf eine breitere Basis gestellt. Dazu werden die Untersuchungen der Prozedur A in Teilen durchgeführt und mit den Resultaten des Kapitel 5 verglichen. Im Anschluss daran werden die angepassten Parameter zur Steuerung der Verifikation, welche in Prozedur B im nordrhein-westfälischen Bildmaterial bestimmt wurden, am Datensatz Hessen getestet.

6.1 Die Untersuchungen der Prozedur A

In diesem Kapitel sollen in erster Linie untersucht werden, wie aussagefähig die in Kapitel 5 erzielten Resultate sind. Das wird erreicht, in dem die Verifikation im hessischen Bildmaterial unter den Bedingungen durchgeführt wird, wie sie aus dem Kapitel 5 bekannt sind. Diese gleichen Bedingungen werden zum einen dadurch erzielt, dass der selbe Parametersatz zur Steuerung (siehe A.1) genutzt wird und zum anderen dadurch, dass die Straßen unter den gleichen Vorgaben digitalisiert wurden. Die Verifikation wird ebenfalls, mit korrekten und inkorrekten Eingangsdaten durchgeführt. Im Anschluss daran werden die Resultate mit denen des Kapitel 5 verglichen.

6.1.1 Die Verifikation von Straßen mit positiven Eingangsdaten

Im ersten Schritt der Untersuchungen fand die Verifikation mit korrektem Datensatz statt. Das geschah analog der Verifikation im Datensatz Nordrhein-Westfalen. Die korrekten Eingangsdaten wurde wiederum vor Beginn



digitalisiert, um bezüglich der Richtigkeit der Straßen Gewissheit zu haben. Dabei fiel auf, dass im Bildmaterial weniger Straßen zur Verfügung standen. So erschienen nur vierzig Straßen mit einer Länge von ca. 7,7 km pro Bild tauglich. Die Verifikation fand demnach im gesamten Bildmaterial in einhundertachtzehn Straßen mit einer Gesamtlänge von ca. 23 km statt.

Da die Ergebnisse der beiden Kapitel verglichen werden sollen, ist es des Weiteren Voraussetzung, den gleichen Parametersatz zur Steuerung der Verifikation zu verwenden. Also wurde erneut der festgesetzte Parametersatz genutzt, welcher im Anhang A.1 aufgeführt ist. Die Verifikation lief mehrfach im Batch ab. Ein Ergebnis dessen ist beispielhaft in Abbildung 42 dargestellt. Darin ist das Resultat der Verifikation im Bild 5244 im Kanal des Farbtons gezeigt. Hierin steht grün für akzeptierte und rot für verworfene Straßen. Das ist analog zu allen Abbildungen der Verifikation. Ferner sind im Vergleich zur Abbildung 5 die Abweichungen des Eingangsmaterials zu erkennen. Dies äußert sich durch den Unterschied in dem Charakter der dargestellten Landschaft.



Abbildung 42: Verifikationsergebnis des Kanals des Farbtons im Bild 5244 mit akzeptierten (grün) und verworfenen Straßen (rot)



Die Ergebnisse der Verifikation fielen, im gesamten betrachtet, überraschend gut aus. Es wurden im Durchschnitt aller Kanäle und Bilder 95% aller Straßen akzeptiert. Dennoch erstreckte sich der Wertebereich der einzelnen Ergebnisse von 86,1% bis zu 100%. Die kanalweisen Schwankungen blieben jedoch erhalten, was eine Wertung der einzelnen Kanäle zulässt. Das Resultat der Verifikationen ist in Form der Mittels in Abbildung 43 dargestellt.

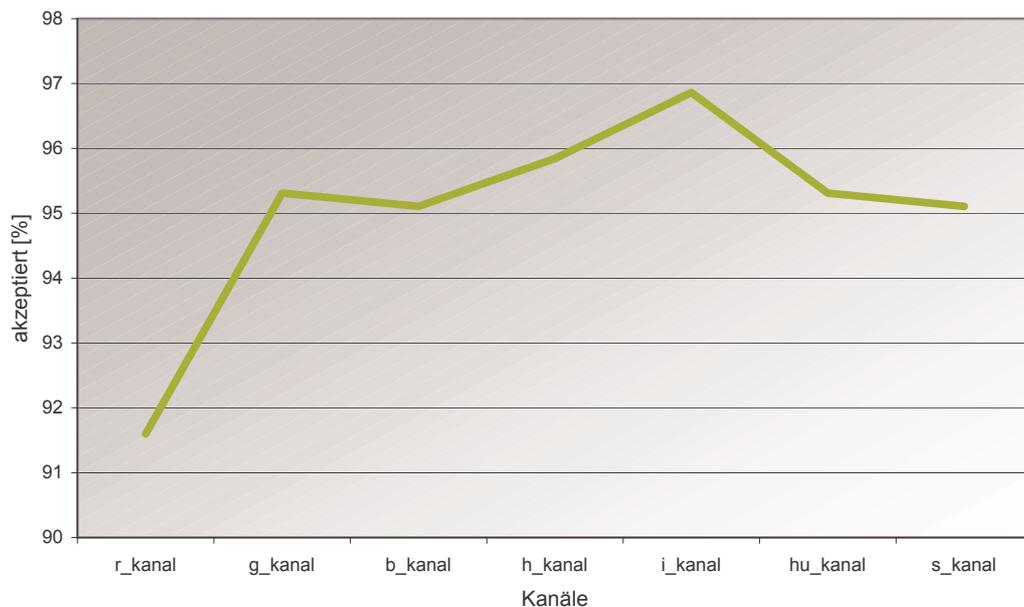


Abbildung 43: Verifikationsergebnis mit positiven Eingangsdaten

In dieser Verifikation wurde im roten Kanal das schlechteste Resultat, mit 91,6% der Straßen, die akzeptiert werden konnten, erzielt. Der Abstand zu den weiteren Kanälen ist überraschend groß. So folgen mit einem Unterschied von 3,5% die Resultate, welche im Kanal der Sättigungen und im blauen Kanal erreicht werden konnten, die beide 95,1% annahmen. In der Bewertung schließt sich dem der Kanal des Farbtons und der Kanal Grün an, in denen das gleiche Resultat erzielt wurde. Dieses lag jedoch mit 95,3% der Straßen, die akzeptiert wurden, unbedeutend höher. Mit der Akzeptanz von 95,8% konnte im Kanal der ersten Hauptachse ein gutes Ergebnis erzielt werden, welches nur im Kanal der Intensitäten überboten werden konnte. In diesem wurden, mit einem deutlichen Unterschied zu den anderen Kanälen, 96,9% aller Straßen angenommen. Der Kanal der Intensitäten war des Weiteren der einzige, im dem es der Software möglich war, bis zu 100% der vorhandenen Straßen zu erkennen. Im Verlauf dieses Kapitels wird gezielt auf die Unterschiede der Verifikationen mit hessischem und nordrhein-westfälischem Datensatz eingegangen. Es folgt als nächste Betrachtung die Sensitivitätsanalyse.



6.1.2 Die Sensitivitätsanalyse

Im folgenden Teil der Untersuchungen wurde die Verifikation aus bereits in Kapitel 5 erläuterten Gründen mit falschen Eingangsdaten durchgeführt. Dieser falsche Datensatz wurde ebenfalls durch Drehung der korrekten Eingangsdaten um 100 Gon erzeugt. Bei der anschließenden Kontrolle, in der überprüft wurde, ob eventuell einzelne Straßen im Datensatz auf linienhaften Strukturen im Bild liegen, konnte dieser Fall erkannt werden. Um die Aussagekraft und Richtigkeit der Untersuchung zu gewährleisten, wurde die davon betroffene Straße aus der Auswertung der Sensitivitätsanalyse entfernt. Nun konnte die Verifikation mit der Software Quala für den Datensatz Hessen erneut, im Batch ablaufend, durchgeführt werden. Das Resultat dessen, ist in Abbildung 44 in Form eines Diagramms dargestellt.

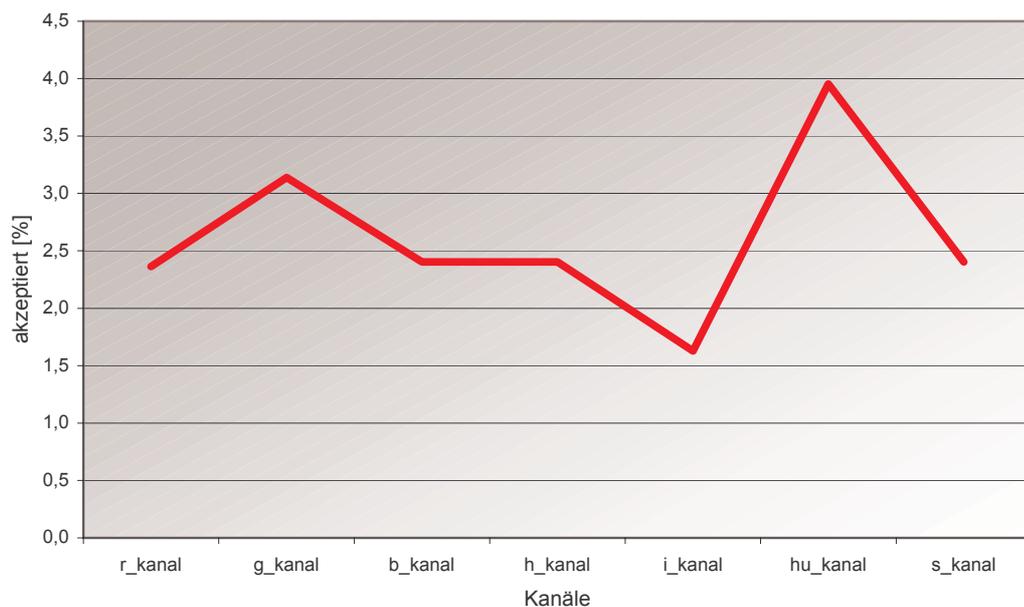


Abbildung 44: Verifikationsergebnis mit negativen Eingangsdaten

In der Untersuchung konnte im Kanal der Intensitäten das sicherste Ergebnis erzielt werden, da lediglich 1,6% der inkorrekten Straßen akzeptiert wurden. Es gelang der Software in diesem Kanal mehrfach, alle Straßen zu verwerfen. Ein ebenfalls gutes Resultat konnte mit 2,3% im roten Kanal erreicht werden. Das schwächste Ergebnis wurde im Kanal des Farbtons erzielt. In diesem Kanal wurden mit einer Akzeptanz von 4% der Straßen 1,6% mehr angenommen, als im Kanal der ersten Hauptachse, im Kanal der Sättigung und im blauen Kanal.



Damit lag das Gesamtniveau der Sensitivitätsanalyse mit durchschnittlich 2,6% der falschen Straßen, die dennoch akzeptiert wurden, über dem Annahmehniveau, welches mit nordrhein-westfälischen Datensatz erzielt wurden. Die Sensitivitätsanalyse ist abgeschlossen, und es können die Ergebnisse im folgenden verschmolzen werden.

6.1.3 Die Verknüpfung der Verifikation mit positiven und negativen Eingangsdaten

Zur Auswertung der Resultate wurden diese erneut in einer Ergebnismatrix verknüpft. Dies fand unter den gleichen Bedingungen statt, wie sie bereits in Kapitel 5 am Beispiel der nordrhein-westfälischen Bilddaten erläutert wurde. Die Determinante wurde folglich nach Formel 5.1. berechnet und in der Abbildung 45 als kanalweises Mittel in Form eines Diagramms dargestellt.

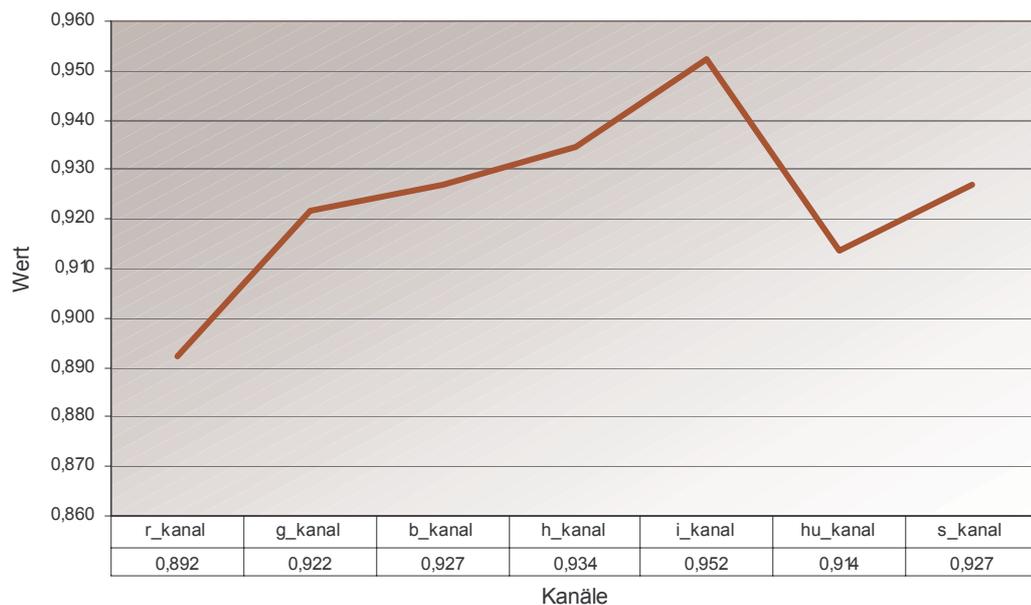


Abbildung 45: Determinante im festgesetzten Parametersatz

Zur Verdeutlichung der kanalweisen Unterschiede in den Resultaten wurde in der Graphik 45 eine Datentabelle angehängen. Diese veranschaulicht die dargestellten Werte. Damit kann abschließend festgestellt werden, dass im Kanal der Intensitäten das beste Resultat erzielt werden konnte. Das war allerdings erwartungsgemäß, da in diesem Kanal ebenfalls die besten Resultate bei der Verifikation mit korrekten und inkorrekten Eingangsdaten erzielt wurde.



Dem folgt eine ebenfalls gute Bewertung, welche im Kanal der Hauptachse erreicht wurde. Dies kristallisierten sich ebenfalls bei der Betrachtung der Einzelergebnisse heraus. Mit einem geringen Unterschied dazu und dem gleichen Ergebnissen untereinander schließt sich dem die Bewertung des blauen und des Sättigungskanals an. Im roten Kanal wurde das schlechteste Resultat der Untersuchung erzielt. Das verwunderte jedoch nicht, da in diesem Kanal in der Verifikation mit korrekten Eingangsdaten die mit Abstand wenigsten Straßen akzeptiert wurden und in der Sensitivitätsanalyse ebenfalls lediglich mittelmäßige Ergebnisse erzielt werden konnten. Zwischen den Bewertungen von Rot und Blau befinden sich die Resultate, welche im Kanal Grün und im Kanal des Farbtons erreicht wurden. In diesen Kanälen wurden damit unterdurchschnittliche Ergebnisse erzielt.

Da nun sowohl die Untersuchung der hessischen Eingangsdaten als auch der nordrhein-westfälischen Daten mit den festgesetzten Steuerungsparametern abgeschlossen sind, werden die erzielten Resultate im folgenden verglichen.

6.1.4 Der Vergleich der Datensätze Hessen und Nordrhein-Westfalen

Der Anwendungsbereich der Software Quala soll territorial nicht begrenzt werden, was dazu führt, dass die Herkunft der Eingangsdaten variiert. Da es das Ziel der Arbeit ist, eine Empfehlung bezüglich der bevorzugten Nutzung eines Kanals auszusprechen, werden im folgenden die Verifikationsergebnisse der verschiedenen Herkunftsländer verglichen. Dabei sollen mögliche Parallelen der kanalweisen Resultate erkannt werden. Dazu wurden die Determinanten der beiden Verifikationen im Diagramm der Abbildung 46 dargestellt.

In der Graphik ist zu erkennen, dass das Niveau in der Verifikation mit hessischem Datensatz wesentlich höher ist. Das bedeutet, dass die Verifikation im hessischen Bildmaterial mit korrekten Eingangsdaten vollständiger und mit inkorrekten Eingangsdaten sicherer ist. Diese Aussage ist jedoch nur bedingt allgemeintauglich, da für die Untersuchungen jeweils nur eine geringe Anzahl an Orthophotos zur Verfügung standen. Damit kann der Grund für die hohen Verifikationen im hessischen Datensatz oder die schlechteren Resultate im nordrhein-westfälischen Bildmaterial die lokalen Gegebenheiten des aufgenommenen Gebietes oder der Aufnahmezeitpunkt sein. Was jedoch aussagekräftig ist, ist der Vergleich der kanalspezifischen Resultate.

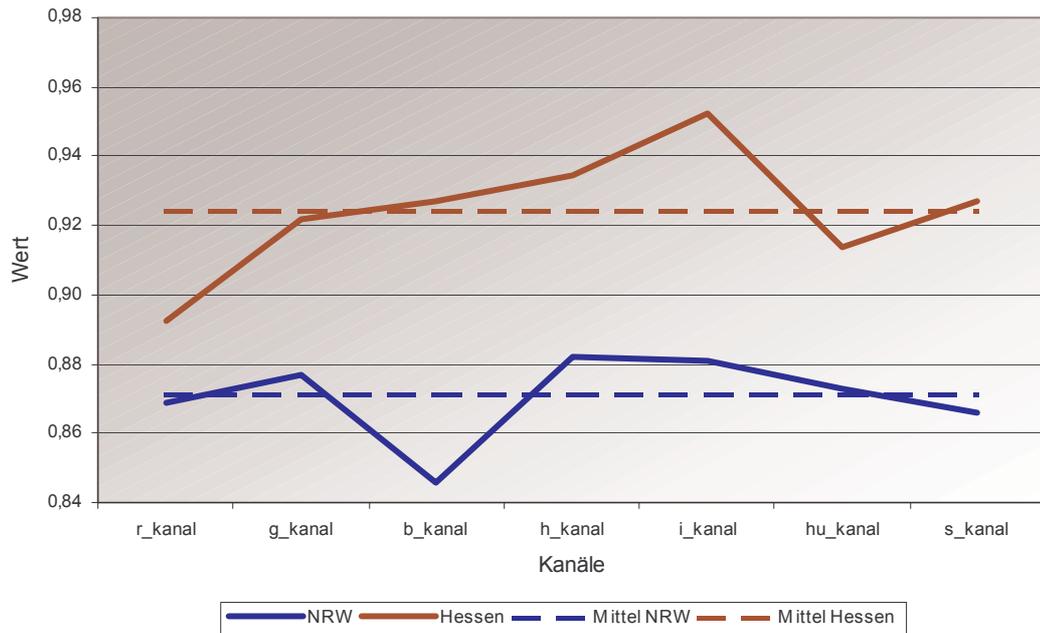


Abbildung 46: Vergleich der Determinanten mit hessischem und nordrhein-westfälischem Datensatz

Es ist zu erkennen, dass sich der Verlauf der Kurven nur bedingt ähnelt. Auch die erreichten Maxima gleichen sich nicht. In den Daten Nordrhein-Westfalens erreichte das Verifikationsmaximum der Kanal der ersten Hauptachse. Dem folgt in der Bewertung, jedoch nur geringfügig schlechter, der Kanal der Intensitäten. Diese Verifikationsspitze hat sich im Ergebnis mit hessischen Daten vertauscht. Darin erzielte der Kanal der Intensitäten die beste Bewertung. Allgemein kann jedoch behauptet werden, dass diese beiden Kanäle mit jedem getestetem Eingangsmaterial, hervorragende Resultate erzielten. Die mit Abstand schlechteste Bewertung erhielt in dem Datensatz NRW der blaue Kanal. Das war im hessischen Datensatz jedoch nicht der Fall. Darin erzielte der blaue Kanal ein verhältnismäßig gutes Resultat. Die schlechteste Bewertung erhielt hier der rote Kanal, der wiederum im Datensatz Nordrhein-Westfalen gut abschnitt. Damit ist in diesem Teil der Bewertung keine Systematik zu erkennen. Die verbleibenden Kanäle erhielten jeweils Bewertungen, die sich im Mittelfeld befanden und Eingangsdatenbedingt schwankten. Ziel ist es jedoch, eine absolute Aussage bezüglich der verschiedenen Bilddaten zu erhalten. Dies ermöglicht Abbildung 47.

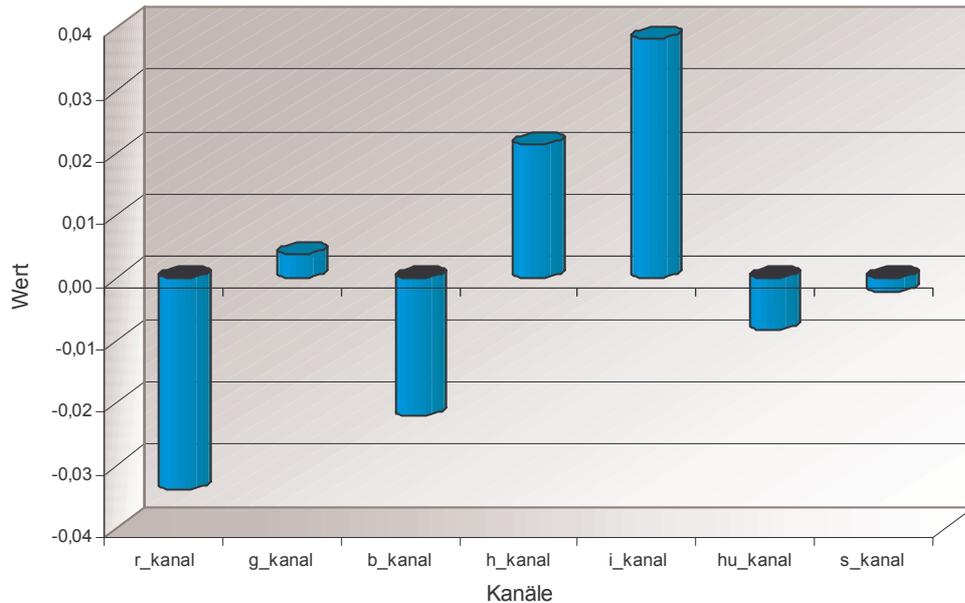


Abbildung 47: Absoluter Vergleich der hessischen und nordrhein-westfälischen Determinanten

Um die kanalweisen Resultate absolut vergleichen zu können, wurden die Determinanten, die sich jeweils aus den Verifikationen mit hessischem und nordrhein-westfälischem Bildmaterial ergaben, einzeln gemittelt. Dieses Mittel ist ebenfalls in Abbildung 46 als gestrichelte Linie dargestellt. Nun wurde jeweils die Differenz berechnet, die sich aus dem Verlauf der Determinante und dem Mittel ergaben. Die so bestimmten Differenzen der nordrhein-westfälischen und hessischen Resultate wurden anschließend kanalweise aufsummiert. Daraus ergab sich Abbildung 47 in der zu erkennen ist, dass im Intensitätskanal gefolgt vom Kanal der Hauptachse das beste Ergebnis erzielt wurden. Das kristallisierte sich jedoch schon bei den einzelnen Untersuchungen heraus. Die schlechtesten Bewertungen erhielten die Kanäle Blau und Rot. Damit kann abschließend nach Betrachtung der Resultate, die sich in den Verifikationen mit unterschiedlichem Bildmaterial ergaben, festgestellt werden, dass sowohl im Intensitätskanal als auch im Kanal der ersten Hauptachse Rahmenbedingungen herrschen, die Extraktionen begünstigen.

6.2 Die Untersuchungen der Prozedur B

Nach dem im Kapitel 5 ein neuer, kanalspezifischer Parametersatz zur Steuerung automatischer Straßenextraktionsverfahren erstellt wurde, ist nun



von Interesse, ob sich mit diesen Parametern (siehe Anhang A.2 bis A.5) im hessischen Datensatz ähnliche erfolge erzielen lassen. Aus diesem Grund wird folgend die Verifikation mit den angepassten Parametern durchgeführt. Anschließend werden die Resultate der Verifikationen mit kanalspezifischen Steuerungsparametern, die mit hessischen und nordrhein-westfälischen Eingangsdaten erzielt wurden, verglichen.

6.2.1 Der Vergleich der Verifikation mit angepassten und festgesetzten Parametern

In dieser Untersuchung wird die Verifikation mit den angepassten Parametern sowohl mit korrekten als auch inkorrekten Eingangsdaten durchgeführt. Der Anspruch an die kanalspezifischen Steuerungsparameter ist nun, die Qualität der Verifikation in ähnlichem Maße zu verbessern, wie das in Kapitel 5 bereits gelang. Ob das in dieser Größenordnung realisiert werden kann ist unklar, da die Parameter im nordrhein-westfälischen Bildmaterial erstellt wurden. Durchgeführt wird dieser Vergleich, in dem in einem ersten Schritt die Ergebnisse mit festgesetzten Parametern, denen mit angepassten Steuerungsparametern gegenübergestellt werden. Das findet mittels der Determinante statt und ist in Abbildung 48 dargestellt.

In der Graphik ist zu erkennen, dass es gelang, die Ergebnisse zu verbessern. Die größte Veränderung ergab sich dabei im Kanal des Farbtons. Darin konnte das Resultat in der Verifikation mit korrekten Eingangsdaten um 2,4% erhöht und in der Sensitivitätsanalyse um 1,6% verbessert werden. Eine ebenfalls enorme Steigerung der Ergebnisse konnte im Kanal der ersten Hauptachse erzielt werden. In diesem gelang es, die Akzeptanz mit inkorrekten Eingangsdaten um 1,6% zu verringern und mit korrektem Datensatz um eben diese Betrag zu erhöhen. Damit kam es zu einer Änderung in der Rangfolge der Wertungen der einzelnen Kanäle, die mit dem zu überprüfenden Parametersatz erzielt wurde. Der Kanal der ersten Hauptachse erzielte nun das beste Resultat. Überrascht hat jedoch das Ergebnis, welches im roten Kanal erzielt wurde. Dieses hat sich in den gleichen Dimensionen verbessert, wie das Resultat der ersten Hauptachse. Nach diesem Fortschritt erhält der rote Kanal nach Anpassung der Parameter nicht mehr die schlechteste Bewertung. Ferner war es möglich, die Resultate im Kanal der Sättigung und im blauen Kanal zu Verbessern was jedoch kaum Einfluss auf die Gesamtwertung nahm.

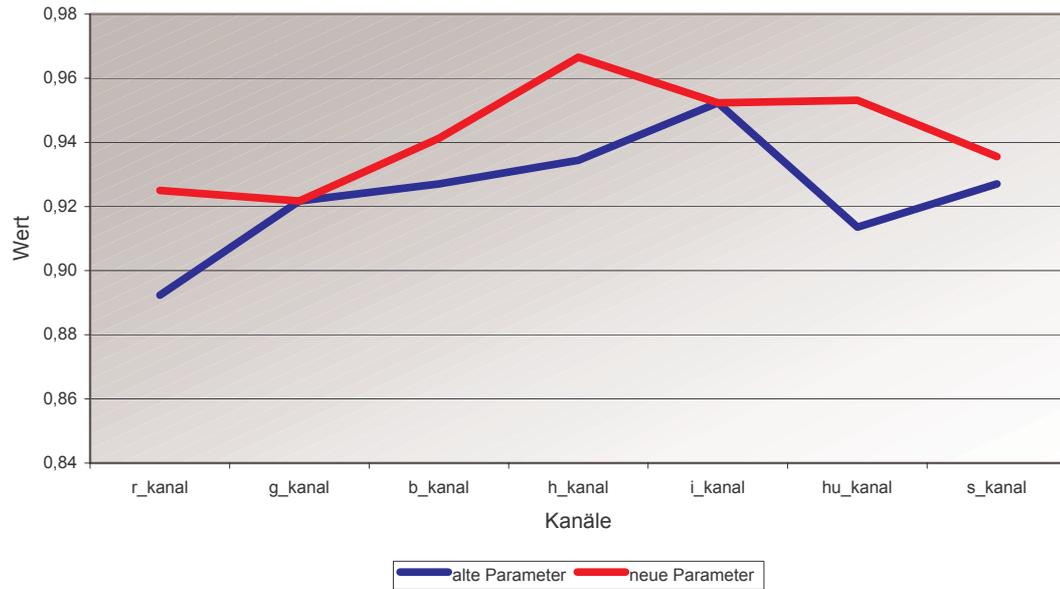


Abbildung 48: Determinanten mit festgesetzten und angepassten Parametern

Die Aufschlüsselung der Resultate und ihrer Differenzierung in Verifikationen mit korrekten und inkorrekten Eingangsdaten sind in Abbildung 49 dargestellt. Darin ist zu sehen, dass es einzig im Kanal der Sättigung, nicht gelang, die Extraktionen mit inkorrekten Eingangsdaten sicherer zu gestalten.

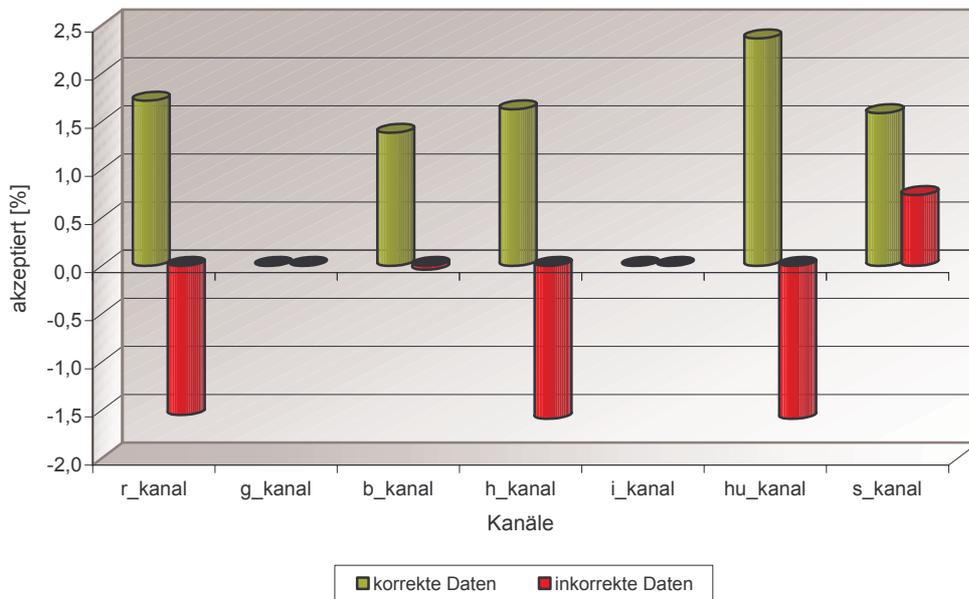


Abbildung 49: Verbesserungen der Verifikation mit positiven und negativen Eingangsdaten



6.2.2 Der Vergleich der Verifikation mit angepassten Parametern im Datensatz Hessen und Nordrhein-Westfalen

Im nächsten Schritt der Auswertung werden die Resultate, die mit den hessischen und nordrhein-westfälischen Eingangsdaten erzielt wurden, gegenübergestellt. Dabei wird der Verlauf der Verifikationsergebnisse mit korrekten und inkorrekten Eingangsdaten in Form der Determinante verglichen. Dies ist in Abbildung 50 dargestellt.

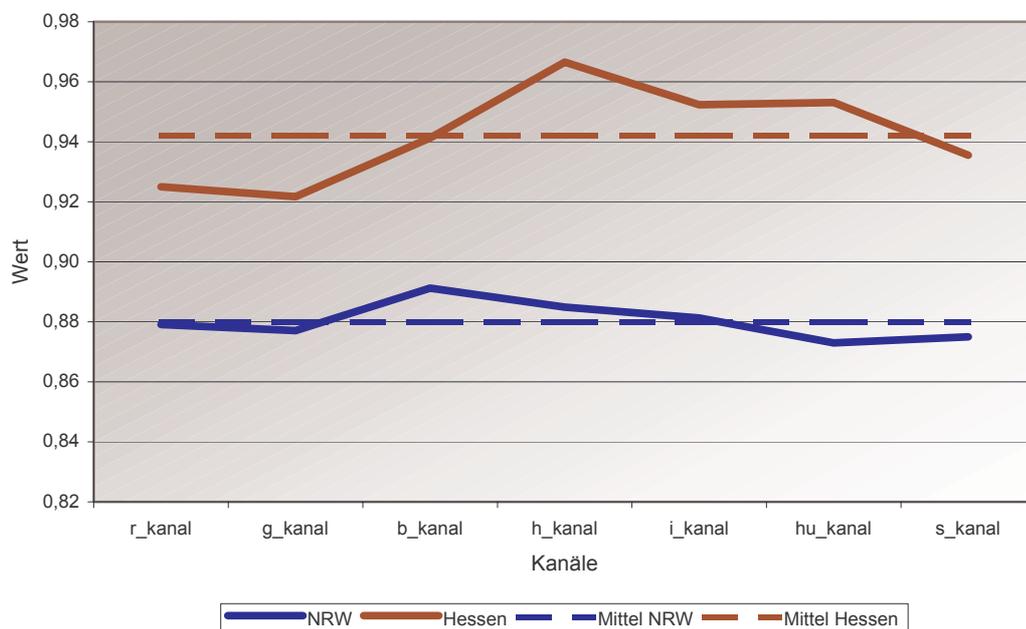


Abbildung 50: Vergleich der Determinanten mit hessischem und nordrhein-westfälischem Datensatz mit angepassten Parametern

Es ist zu erkennen, dass die Anpassung der Parameter an den jeweiligen Kanal ein großes Potential in sich birgt. Dadurch kommt es in der Wertung der Kanäle zu einer Veränderung der Rangfolge. Im hessischen Datensatz verschob sich die Verifikationsspitze vom Intensitätskanal auf den Kanal der ersten Hauptachse. Im Ergebnis mit nordrhein-westfälischem Datensatz fand, bedingt von den angepassten Parametern, ebenfalls eine Veränderung statt, so dass sich das Verifikationsmaximum vom Kanal der Hauptachse auf den blauen Kanal verlagerte. Damit differierten die Kanäle der besten Wertung der verschiedenen Eingangsdaten erneut. Um eine gemeinsame Bewertung durchzuführen, werden die Resultate in Abbildung 51 vereinigt.

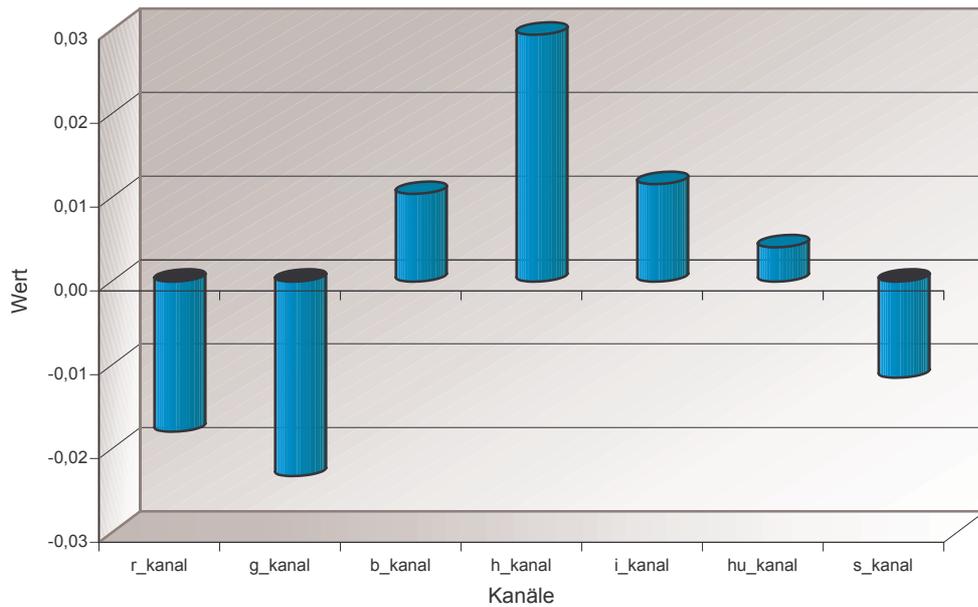


Abbildung 51 : Absoluter Vergleich der hessischen und nordrhein-westfälischen Determinanten

Die Verknüpfung der Determinanten fand analog der Berechnung in Kapitel 6.1.4 statt. Damit ist es nun möglich, die erzielten Resultate zu werten. Es zeigt sich, dass im Kanal der ersten Hauptachse die besten Resultate erzielt werden können. Das lässt den Schluss zu, dass dieser Kanal ebenfalls mit angepassten Parametern Rahmenbedingungen besitzt, die Extraktionen begünstigen. Ebenfalls gute Resultate konnten im Kanal der Intensitäten und im blauen Kanal erreicht werden. Damit stellen diese auf Grund der geometrischen Ungenauigkeit des Kanals der ersten Hauptachse Alternativen dar. Das schlechteste Ergebnis wurde im grünen Kanal erzielt, mit jedoch geringem Abstand zum roten Kanal. Damit kann von Verifikationen in diesen Kanälen mit angepassten Parametern abgeraten werden. Die verbleibenden Kanäle erzielten in der Bewertung durchschnittliche Resultate.

Damit zeigt sich, dass obwohl der angepasste Parametersatz im Bildmaterial Nordrhein-Westfalens erstellt wurde, dennoch erhebliche Verbesserungen bei der Verifikation im hessischen Datensatz erzielt werden konnten. Das bedeutet, dass die Kontrolle des erstellten Parametersatzes erfolgreich war und einer Anwendung nichts im Wege steht.



6.3 Die Bewertung des Bildmaterials

In den durchgeführten Analysen wurden speziell im Kapitel 6 die Resultate, die im hessischen und nordrhein-westfälischen Bildmaterial erzielt werden konnten, verglichen. Dabei stellte sich heraus, dass sich das Niveau der erlangten Ergebnisse stark unterschied. Das zeigt sich beispielsweise beim Vergleich der durchschnittlich akzeptierten Straßen mit positiven Eingangsdaten. Im nordrhein-westfälischen Bildmaterial wurden durchschnittlich 89,2% aller Straßen mit festgesetztem Parametersatz angenommen. Dem steht im hessischen Bildmaterial eine Akzeptanz von 95% aller Straßen gegenüber. Damit ergibt sich ein Unterschied von 5,8%. Die Differenz bei der Betrachtung der Extraktion mit angepasstem Parametersatz ist ebenfalls in dieser Dimension. Von Interesse sind an dieser Stelle die Anlässe für die verschiedenen Resultate. Es ist denkbar, dass ein geringes Rauschen verantwortlich ist, welches im nordrhein-westfälischen Bildmaterial erkannt werden konnte. Letztlich können darüber jedoch nur Vermutungen angestellt werden. Die Gründe für dieses Rauschen könnten beispielsweise in der Herstellung liegen, da diese zum Teil vom Operateur abhängig ist. Des Weiteren ist denkbar, dass kleine Unstimmigkeiten im Filmmaterial oder im Scanner dies bedingen. Letztlich entsteht auch eine gewisse Abhängigkeit zu den meteorologischen Bedingungen am jeweiligen Aufnahmetag, da auch schlechte Wetterbedingungen wie Nebel, Smog oder ähnliches die Aufnahmequalität beeinflussen. Da sich die Betrachtungen Nordrhein-Westfalens einzig auf das Bildmaterial eines Flugstreifens beziehen, ist die Anfälligkeit gegenüber solcher Einflüsse hoch. Um dies genauer zu bestimmen, muss das Bildmaterial bezüglich seiner Eigenschaften und Unterschiede genauer untersucht werden, was jedoch nicht Inhalt dieser Arbeit ist.



7. Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Die Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden verschiedene Fernerkundungsdaten bezüglich ihrer Eignung für automatische Straßenextraktionsverfahren untersucht. In einem zweiten Schritt wurden kanalweise geeignete Parametersätze erstellt.

Es wurde eine Vielzahl von Untersuchungen und Analysen im Bildmaterial Nordrhein-Westfalen durchgeführt, deren Zweck es war, die sieben Kanäle Rot, Grün, Blau, erste Hauptachse, Intensitäten, Farbton und Sättigung zu vergleichen. Dabei stellte sich raus, dass im Kanal der ersten Hauptachse die besten Resultate bezüglich der Vollständigkeit und Sicherheit in der Verifikation erzielt wurden. Des Weiteren wurden in diesem Kanal jedoch erzeugungsbedingte Schwächen in der geometrischen Genauigkeit erkannt. Das führte zu einer Aufwertung des Resultates, welches im Intensitätskanal erzielt werden konnte.

Folgend wurde auf der Grundlage von Grauwertanalysen der Parametersatz zur Steuerung der Verifikation kanalspezifisch angepasst. Dabei konnte in lediglich zwei Kanälen keine Verbesserung der Resultate erzielt werden. Die größte Steigerung wurde im blauen Kanal erricht, welcher mit neuem Parametersatz nun gesamt betrachtet bei der Untersuchung im nordrhein-westfälischen Bildmaterial das beste Resultat erbrachte.

Die erzielten Ergebnisse galt es nun im hessischen Bildmaterial zu bestätigen und damit die Untersuchungen auf eine breitere Basis zu stellen. In diesem Datensatz mit allgemeinen Parametern erzielte der Kanal der Intensitäten das beste Resultat. Damit wird das im nordrhein-westfälischen Bildmaterial erreichte Ergebnis bestätigt, da dieser Kanal darin ebenfalls gute Resultate erlangte.

Bei der Anwendung der angepassten Parameter im hessischen Bildmaterial zeigte sich erneut die Qualität der Verifikation im Kanal der ersten Hauptachse, da ein geringfügig besseres Resultat als im Kanal der Intensitäten geliefert wurde.



Um das Ziel der Arbeit aufzugreifen, kann abschließend der Kanal der ersten Hauptachse, sowie der Kanal der Intensitäten mit den dazugehörigen, angepassten Parametern für die Anwendung in automatischen Straßenextraktionsverfahren empfohlen werden. Dabei sollte jedoch die geometrische Ungenauigkeit des Kanals der ersten Hauptachse berücksichtigt werden.

7.2 Der Ausblick

Mit den erzielten Resultaten sind die Betrachtungen der Analysen von Fernerkundungsdaten für automatische Straßenextraktionsverfahren trotz der erzielten Verbesserungen nicht abzuschließen. Die Ergebnisse beruhen auf der Untersuchung des Bildmaterials zweier verschiedener Quellen. Da der spätere Einsatz des Extraktionsverfahrens territorial nicht begrenzt wird, könnte durch die Untersuchung des Bildmaterials weiterer Quellen ein allgemein gültiges Resultat angestrebt werden.

Frühere Arbeiten stellten bereits die Zweckmässigkeit der Unterscheidung in verschiedenen Regionen dar, in welchen ebenfalls kontextspezifische Parameter erstellt wurden. Die Untersuchungen dieser Arbeit beziehen sich jedoch einzig auf die Kontextregion agrar, da diese den größten Anteil der Fläche darstellt. Aus dem Grund könnte eine Verknüpfung der kanal- und kontextspezifischen Eigenschaften die Resultate, auch in Bereichen wie urban oder forest verbessern.

Da bei den kanalweise differierenden Resultaten nicht einfach nur mehr oder weniger, sondern unterschiedliche Straßen akzeptiert werden, bieten sich Untersuchungen an, welche Kombinationen von Kanälen bezüglich des Extraktionsverhaltens analysieren. Durch eine folgende Verknüpfung von Kanälen könnte es möglich sein, die Sicherheit und Vollständigkeit der Resultate erheblich zu verbessern. Ansatzweise wurde dies in vorliegender Arbeit durchgeführt.

Des Weiteren ist auch das Potential der Anwendung geeigneter Filter im Zuge einer Vorverarbeitung in der Problematik der kanalspezifischen Betrachtung zu beachten. Durch einen gezielten Einsatz dieser ist eventuell eine Erhöhung der Extraktionsqualität zu erreichen. Des Weiteren ist man dadurch unempfindlicher



gegen die teilweise differierenden Eigenschaften des verwendeten Bildmaterials beziehungsweise störender Einflüsse wie Rauschen o.ä..

Das Eingangsmaterial in Form eines Orthophotos ist momentan das Produkt von Befliegungen, die im Zuge der Aktualisierung im angestrebten Intervall von fünf Jahren durchgeführt werden. Damit findet eine gewisse Bindung an das Aktualisierungsintervall statt, die nur durch eigens beauftragte Bildflüge zu lösen ist. Eine Alternative stellen jedoch Satellitenaufnahmen dar, die mit Bodenpixelgrößen von unter 2 Metern in die Betrachtungen aufgenommen werden sollten. Diese bieten zu dem Aufnahmen in bis zu sieben spektralen Bereichen, deren Eignung für automatische Straßenextraktionsverfahren zu untersuchen ist.



Literaturverzeichnis

- [ADV, 2003] : *ATKIS-Objektartenkatalog*,
http://www.adv-online.de/veroeffentlichungen/atkis_index.htm
- [BAUMGARTNER, 2003] : *Automatische Extraktion von Straßen aus digitalen Luftbildern*,
Dissertation, Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU München
- [BUSCH UND WILLRICH, 2002] : *Quality Management of ATKIS Data*,
OEEPE/ISPRS Joint Workshop on Spatial Data Quality Management, 21-22 März, Istanbul,
Seite 30-41
- [GERKE ET AL., 2003] : *Graph Supported Verification of Road Databases*,
M. Gerke, M. Butenuth, Ch. Heipke, F. Willrich,
Institut für Photogrammetrie und GeoInformation,
Universität Hannover
- [HAKE ET AL., 2002] : *Kartographie: Visualisierung raum-zeitl. Informationen*,
Hake, Grünreich, Meng; 8 Auflage – Berlin;
New York : de Gruyter
- [INTEND, 2003] : *INTEND Geoinformatik*,
http://www.intend.de/pages/ger/index/index_forst-gis.htm
- [LILLESAND UND KIEFER, 1994] : *Remote Sensing and Image Interpretation*,
John Wiley und Sons, inc., New York
- [PELZER, 1980] : *Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung*,
Konrad Wittwer Verlag, Stuttgart



- [RICHARDS UND JIA, 1999] : *Remote Sensing Digital Image Analysis*
Springer – Verlag, Berlin, Heidelberg, New York
- [ROSNER UND KAUFMANN, 2001] : *Logistische Strategien und GIS-gestützte Optimierung*,
Hans-Joachim ROSNER und Thilo KAUFMANN,
www.agit.at/papers/2001/rosner_EAR.pdf
- [STEGER, 1998] : *An Unbiased Detector of Curvilinear Structures*,
IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine
Intelligence, Vol. 20, No. 2 , Seite: 113-125
- [WIEDEMANN, 2002] : *Extraktion von Straßennetzen aus optischen Satellitenbildern*,
Dissertation, Lehrstuhl für Photogrammetrie und
Fernerkundung, TU München



Abkürzungsverzeichnis

ATKIS	Amtliches Topografisches Kartographisches InformationsSystem
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
DGM	digitales Geländemodell
DLM	digitales Landschaftsmodell
DOM	digitales Oberflächenmodell
DOP5	digitales Orthophoto 1: 5000
EDBS	Einheitliche Datenbankschnittstelle
GIS	Geoinformationssystem
IHS	Intensity Hue Saturation
NRW	Nordrhein Westfalen
RGB	Rot Grün Blau
TUM	Technische Universität München
WIPKA	Wissensbasierter Photogrammetrisch – Kartographischer Arbeitsplatz
Quala	Quality Analysis of ATKIS-data



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bewertungsfunktion der Linienbreite (fuzzy)	9
Abbildung 2: Komponenten des Systems zur Aktualisierung	12
Abbildung 3: IHS Farbraum (links), RGB Farbraum (rechts)	27
Abbildung 4: Transformation dreier korrelierter Kanäle in die Hauptkomponenten	29
Abbildung 5: Verifikationsergebnis des roten Kanals im Bild 1486 mit akzeptierten (grün) und verworfenen Straßen (rot)	36
Abbildung 6: Verifikationsergebnis mit positiven Eingangsdaten	37
Abbildung 7: Fehlerhafte Verifikation einer Straße: a) Straße im Bild, b) Extraktion, c) Ergebnis der Verknüpfung, d) Bewertung (rot = verworfen)	38
Abbildung 8: Anzahl n der Linienstücke	40
Abbildung 9: Kanalweise Straßenbreiten	41
Abbildung 10: Mittel der Standardabweichung	42
Abbildung 11: Kombination von Kanälen	43
Abbildung 12: Verifikationsergebnis des blauen Kanals im Bild 1486 mit akzeptierten (grün) und verworfenen Straßen (rot)	45
Abbildung 13: Verifikationsergebnis mit negativen Eingangsdaten	46
Abbildung 14: Fehlerhafte Verifikation: a) Extraktion, b) Ergebnis der Verknüpfung, c) Bewertung (grün = akzeptiert), 1) forest, 2) agrar, 3) urban + forest	47
Abbildung 15: Anzahl n der Linienstücke im Mittel	48
Abbildung 16: Determinanten im festgesetzten Parametersatz	51
Abbildung 17: Grauwertprofil quer zum Verlauf einer Straße	53
Abbildung 18: Kontrast im Bildmaterial NRW	54
Abbildung 19: Grauwertverlauf in Richtung der Straße	55
Abbildung 20: Grauwertdifferenzen benachbarter Pixel	56
Abbildung 21: Grauwertunterschied im Mittel	57
Abbildung 22: Absolutes Grauwertniveau im Bezug zu Rot	58
Abbildung 23: Verifikationsergebnis des roten Kanals im Bild 1086, mit akzeptierten (grün) und verworfenen Baumreihen (rot)	59
Abbildung 24: Verifikationsergebnis mit Baumreihen	60
Abbildung 25: Fehlerhafte Verifikation von Baumreihen: a) Extraktion, b) Ergebnis der Verknüpfung, c) Bewertung (grün = akzeptiert, rot = verworfen), 1) Baumreihe verworfen,	61



Abbildung 26: Grauwertprofil quer zum Verlauf der Baumreihe _____	62
Abbildung 27: Grauwertverlauf in Richtung einer Baumreihe _____	63
Abbildung 28: Grauwertdifferenz benachbarter Pixel _____	64
Abbildung 29: Grauwertunterschiede im Mittel _____	64
Abbildung 30: Verifikationsergebnis mit korrekten Eingangsdaten bei Veränderung des Parameters contrast_high _____	68
Abbildung 31: Verifikationsergebnis mit inkorrekten Eingangsdaten bei Veränderung des Parameters contrast_high _____	69
Abbildung 32: Determinante contrast_high _____	70
Abbildung 33: Verifikationsergebnis mit korrekten Eingangsdaten bei Veränderung des Parameters contrast_low _____	71
Abbildung 34: Verifikationsergebnis mit inkorrekten Eingangsdaten bei Veränderung des Parameters contrast_low _____	72
Abbildung 35: Determinanten contrast_low _____	73
Abbildung 36: Determinanten der Parameterkombinationen _____	74
Abbildung 37: Gegenüberstellung der Determinanten mit alten und vorläufig neuen Parametern _____	75
Abbildung 38: Determinanten mit alten und neuen Parametern _____	76
Abbildung 39: Verbesserungen der Verifikation mit positiven und negativen Eingangsdaten _____	76
Abbildung 40: Vergleich neuer und alter Parameter bei Baumreihen _____	78
Abbildung 41: Verifikationsergebnisse mit a) festgesetzten und b) angepassten Parametern _____	79
Abbildung 42: Verifikationsergebnis des Kanals des Farbtönen im Bild 5244 mit akzeptierten (grün) und verworfenen Straßen (rot) _____	81
Abbildung 43: Verifikationsergebnis mit positiven Eingangsdaten _____	82
Abbildung 44: Verifikationsergebnis mit negativen Eingangsdaten _____	83
Abbildung 45: Determinante im festgesetzten Parametersatz _____	84
Abbildung 46: Vergleich der Determinanten mit hessischem und nordrhein-westfälischem Datensatz _____	86
Abbildung 47: Absoluter Vergleich der hessischen und nordrhein-westfälischen Determinanten _____	87
Abbildung 48: Determinanten mit festgesetzten und angepassten Parametern _____	89
Abbildung 49: Verbesserungen der Verifikation mit positiven und negativen Eingangsdaten _____	89
Abbildung 50: Vergleich der Determinanten mit hessischem und nordrhein-westfälischem Datensatz mit angepassten Parametern _____	90
Abbildung 51 : Absoluter Vergleich der hessischen und nordrhein-westfälischen Determinanten _____	91



Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: extrLines _____	17
Tabelle 2: smsplLines _____	18
Tabelle 3: assessLines _____	18
Tabelle 4: fuseLines _____	19
Tabelle 5: splitLines _____	19
Tabelle 6: shortestPaths _____	20
Tabelle 7: Matrix der Verifikationsergebnisse mit positiven und negativen Eingangsdaten _____	49
Tabelle 8: Tabelle der Determinanten _____	50
Tabelle 9: vorläufige kanalweise Parameterkombinationen _____	74
Tabelle 10: empfohlene kanalweise Parameterkombinationen _____	77



Anhang

A.1 Die festgesetzten Parameter zur Steuerung der Verifikation

Parameter	Wert
EXTRLINES	
LINE_WIDTH	4.0
CONTRAST_HIGH	40
CONTRAST_LOW	5
LINE_BRIGHTNESS	light
EXTRAKT_WIDTH	true
CORRECT_POSITION	true
COMPLETE_JUNCTIONS	true
THRESHOLD	0
EXTRACT_INSIDE_MASK	true
SMSPLINES	
SMOOTH_LENGTH	5
MAX_CURVATURE	0.1
ASSESSLINES	
LENGTH	0 50
DIRECTION_DEV	0 10
WIDTH	2 3 8 14
WIDTH_DEV	0 5
GREY_DEV	0 20
MAX_RAMER_DISTANCE	-1
FUSELINES	
WEIGHT_SCALES_LIGHT	1
WEIGHT_SCALES_DARK	1
WEIGHT_SCALES_SEED	1
BUFFER_WIDTH	8
MAX_DIRECTION_DIFFERENCE	30
SPLITLINES	
SPLITTED_JUNCTION_DISTANCE	5
SHORTESTPATHS	
RESOLUTION	1.0
WEIGHT	0 1
ABS_DISTANCE	2 80
REL_DISTANCE	1 4
COLLINEAR	0 35
JUNCTION	55 90
MAX_DIST_JUNCTION	5
SCALE_LENGTH	true
WEIGHT_SEEDPOINT	1.0
MIN_DISTANCE	0



A.2 Die angepassten Parameter zur Steuerung der Verifikation im Kanal Rot, der ersten Hauptachse und der Sättigung

Parameter	Wert
EXTRLINES	
LINE_WIDTH	4.0
CONTRAST_HIGH	50
CONTRAST_LOW	10
LINE_BRIGHTNESS	light
EXTRAKT_WIDTH	true
CORRECT_POSITION	true
COMPLETE_JUNCTIONS	true
THRESHOLD	0
EXTRACT_INSIDE_MASK	true
SMSPLINES	
SMOOTH_LENGTH	5
MAX_CURVATURE	0.1
ASSESSLINES	
LENGTH	0 50
DIRECTION_DEV	0 10
WIDTH	2 3 8 14
WIDTH_DEV	0 5
GREY_DEV	0 20
MAX_RAMER_DISTANCE	-1
FUSELINES	
WEIGHT_SCALES_LIGHT	1
WEIGHT_SCALES_DARK	1
WEIGHT_SCALES_SEED	1
BUFFER_WIDTH	8
MAX_DIRECTION_DIFFERENCE	30
SPLITLINES	
SPLITTED_JUNCTION_DISTANCE	5
SHORTESTPATHS	
RESOLUTION	1.0
WEIGHT	0 1
ABS_DISTANCE	2 80
REL_DISTANCE	1 4
COLLINEAR	0 35
JUNCTION	55 90
MAX_DIST_JUNCTION	5
SCALE_LENGTH	true
WEIGHT_SEEDPOINT	1.0
MIN_DISTANCE	0



A.3 Die angepassten Parameter zur Steuerung der Verifikation im Kanal Grün und im Intensitätskanal

Parameter	Wert
EXTRLINES	
LINE_WIDTH	4.0
CONTRAST_HIGH	40
CONTRAST_LOW	5
LINE_BRIGHTNESS	light
EXTRAKT_WIDTH	true
CORRECT_POSITION	true
COMPLETE_JUNCTIONS	true
THRESHOLD	0
EXTRACT_INSIDE_MASK	true
SMSPLINES	
SMOOTH_LENGTH	5
MAX_CURVATURE	0.1
ASSESSLINES	
LENGTH	0 50
DIRECTION_DEV	0 10
WIDTH	2 3 8 14
WIDTH_DEV	0 5
GREY_DEV	0 20
MAX_RAMER_DISTANCE	-1
FUSELINES	
WEIGHT_SCALES_LIGHT	1
WEIGHT_SCALES_DARK	1
WEIGHT_SCALES_SEED	1
BUFFER_WIDTH	8
MAX_DIRECTION_DIFFERENCE	30
SPLITLINES	
SPLITTED_JUNCTION_DISTANCE	5
SHORTESTPATHS	
RESOLUTION	1.0
WEIGHT	0 1
ABS_DISTANCE	2 80
REL_DISTANCE	1 4
COLLINEAR	0 35
JUNCTION	55 90
MAX_DIST_JUNCTION	5
SCALE_LENGTH	true
WEIGHT_SEEDPOINT	1.0
MIN_DISTANCE	0



A.4 Die angepassten Parameter zur Steuerung der Verifikation im Kanal Blau

Parameter	Wert
EXTRLINES	
LINE_WIDTH	4.0
CONTRAST_HIGH	45
CONTRAST_LOW	15
LINE_BRIGHTNESS	light
EXTRAKT_WIDTH	true
CORRECT_POSITION	true
COMPLETE_JUNCTIONS	true
THRESHOLD	0
EXTRACT_INSIDE_MASK	true
SMSPLINES	
SMOOTH_LENGTH	5
MAX_CURVATURE	0.1
ASSESSLINES	
LENGTH	0 50
DIRECTION_DEV	0 10
WIDTH	2 3 8 14
WIDTH_DEV	0 5
GREY_DEV	0 20
MAX_RAMER_DISTANCE	-1
FUSELINES	
WEIGHT_SCALES_LIGHT	1
WEIGHT_SCALES_DARK	1
WEIGHT_SCALES_SEED	1
BUFFER_WIDTH	8
MAX_DIRECTION_DIFFERENCE	30
SPLITLINES	
SPLITTED_JUNCTION_DISTANCE	5
SHORTESTPATHS	
RESOLUTION	1.0
WEIGHT	0 1
ABS_DISTANCE	2 80
REL_DISTANCE	1 4
COLLINEAR	0 35
JUNCTION	55 90
MAX_DIST_JUNCTION	5
SCALE_LENGTH	true
WEIGHT_SEEDPOINT	1.0
MIN_DISTANCE	0



A.5 Die angepassten Parameter zur Steuerung der Verifikation im Kanal des Farbtons

Parameter	Wert
EXTRLINES	
LINE_WIDTH	4.0
CONTRAST_HIGH	45
CONTRAST_LOW	10
LINE_BRIGHTNESS	light
EXTRAKT_WIDTH	true
CORRECT_POSITION	true
COMPLETE_JUNCTIONS	true
THRESHOLD	0
EXTRACT_INSIDE_MASK	true
SMSPLINES	
SMOOTH_LENGTH	5
MAX_CURVATURE	0.1
ASSESSLINES	
LENGTH	0 50
DIRECTION_DEV	0 10
WIDTH	2 3 8 14
WIDTH_DEV	0 5
GREY_DEV	0 20
MAX_RAMER_DISTANCE	-1
FUSELINES	
WEIGHT_SCALES_LIGHT	1
WEIGHT_SCALES_DARK	1
WEIGHT_SCALES_SEED	1
BUFFER_WIDTH	8
MAX_DIRECTION_DIFFERENCE	30
SPLITLINES	
SPLITTED_JUNCTION_DISTANCE	5
SHORTESTPATHS	
RESOLUTION	1.0
WEIGHT	0 1
ABS_DISTANCE	2 80
REL_DISTANCE	1 4
COLLINEAR	0 35
JUNCTION	55 90
MAX_DIST_JUNCTION	5
SCALE_LENGTH	true
WEIGHT_SEEDPOINT	1.0
MIN_DISTANCE	0