

### 3 Digitale Bildverarbeitung

Die digitale Bildverarbeitung hat dafür zu sorgen, daß Bilddaten geometrisch korrekt, kontrastreich und thematisch adäquat zusammengestellt werden. Maßstab hierfür ist das Anwendungsgebiet der Daten. Die Hauptschritte sind dabei

- die Bildkorrektur, die
  - radiometrische Korrektur und
  - Entzerrung umfaßt,
- die Georeferenzierung,
- die Bildverbesserung und
- die Klassifizierung.

Eine Interpretation aus Fernerkundungsdaten verlangt eine geometrisch korrekte Bildinterpretationsbasis in Form von Bildmosaiken, aus der tektonische Lineamente und Schichtköpfe und -grenzen möglichst deutlich und lagegenau interpretiert werden können.

Dabei sind Satellitenbilddaten und Luftbilddaten grundsätzlich unterschiedlich in ihrer Aufnahmetechnik und Aufnahmegeometrie. Während Luftbilder meist als Schwarz-Weiß-Abzug einer panchromatischen Aufnahme in analoger Form und Zentralperspektive vorliegen, liefern Satellitenbildsysteme multispektrale Scanneraufnahmen in Form von numerischen Rasterwerten in einer nahezu orthogonalen Projektion. Daher waren unterschiedliche Entzerrungsverfahren notwendig, um die vorhandenen Luftbild- und Satellitendaten interkompatibel in die Datenbasis des GIS zu integrieren. Dies bedeutete zuerst, die Luftbilddaten vom analogen in ein digitales Format zu überführen und Luft- und Satellitenbilddaten zu georeferenzieren, um sie in einer gemeinsamen Kartengeometrie darstellen und analysieren zu können. Letzteres gestaltete sich bei den Luftbildern ungleich schwieriger, da die Radialverschiebung durch die Herstellung von Orthophotos korrigiert werden mußte, was wiederum das Vorhandensein eines Geländemodells erfordert. Es wurden ein Orthophotomosaik und ein Landsat-ETM-Mosaik erstellt.

Die Satellitenbilder und Luftbilder wurden in ihrer Anwendung auf Fragestellungen der Geologie qualitativ untersucht. Hierbei wurden geologische Einheiten und Strukturen visuell interpretiert. Dazu mußte der Inhalt des Bildmaterials in einer für das Auge des Interpreten optimalen Weise erkennbar sein. Ziel der digitalen Bildverarbeitung in dieser Arbeit war es also, den Informationsgehalt von fernerkundlich gewonnenen Daten für eine anschließende visuelle Interpretation durch analytische Operationen und hochwertige Ausgabesysteme optimal hervorzuheben. Dabei kam es darauf an, Unterschiede im spektralen Verhalten der Gesteine hervorzuheben, und dabei Redundanz von Informationen zu vermeiden.

Der Schwerpunkt der Arbeit lag in einer tektonischen Interpretation, so spielt die digitale Klassifizierung hier nur eine Nebenrolle. Trotzdem kamen zur geologischen Auswertung verschiedene digitale Klassifizierungsmethoden zur Anwendung, um die Interpretationsergebnisse in Bezug auf Schichtgrenzen zu überprüfen.

In dieser Untersuchung wurden dazu die Programmpakete PCI Geomatics v7.0 und 8.0 und ENVI 3.1 bis 3.2 auf PC genutzt. Als Ausgabegerät zur visuellen Interpretation stand ein IRIS 3047 Plotter im A0-Format zur Verfügung, der eine Pixelauflösung von bis zu 12/mm leistet, sowie ein HP 5000 Plotter im Format 107 cm Papierbreite auf Rolle.

In diesem Kapitel werden die Bildverarbeitungsmethoden für die Berechnung der erstellten digitalen Bildmosaike sowie die verwendeten analytischen Operationen vorgestellt und erläutert.

### 3.1 Orthophotomosaik

Die herkömmliche Luftbildinterpretation liefert bei geringem Aufwand immer noch eine hohe geometrische Genauigkeit im Vergleich zur Auswertung von digitalen Satellitendaten. Entsprechend der Problemstellung stand die möglichst lagegenaue Interpretation von Lineamenten und geologischen Grenzen im Vordergrund. Hierbei bieten Luftbilder den Vorteil der stereoskopischen Betrachtungsweise, die viele im Satellitenbild verborgene Detailstrukturen hervorhebt. Gleichzeitig bietet das Luftbild die Möglichkeit zur direkten Messung von Geländedaten wie Einfallen und Streichen.

Luftbilder und Satellitenbilder unterscheiden sich in mehreren Punkten grundlegend in ihrer Aufnahmeart. Tabelle 3-1 faßt diese Unterschiede zusammen.

	Luftbilder	Satellitenbilder
Aufnahmegeometrie	Zentralperspektive	Orthogonalperspektive (Zeilendetektor) Perpendikularverschiebung ( <i>line-track Scanner</i> )
Datentyp	Analog	Digital
Radiometrische Auflösung	Panchromatisch bis wenige Kanäle	Mehrkanalig bis hyperspektral
Aufgenommenes Spektrum	Meist visuelles bis VNIR	UV bis Mikrowellen
Sensormodus	Passiv	Passiv und aktiv

Tab. 3-1: Einige grundlegende typische Unterschiede zwischen Luftbild und Satellitenbild.

Nachteile bei der Verwendung von Luftbildern sind die höchst unterschiedliche Bildqualität der Luftbilder, die analoge Speicherform sowie die für den Einsatz im GIS ungünstige Zentralperspektive. Es mußten daher eine Reihe von Verarbeitungsschritten durchgeführt werden, um die Luftbilddaten in das zu erstellende GIS zu integrieren.

In einem ersten Schritt wurden die 76 verwendeten Luftbilder zu diesem Zweck gescannt und dadurch in ein digitales Rasterformat überführt. Der verwendete Scanner ist ein Umax Mirage II mit einer räumlichen Auflösung von 300 dpi (12dppm).

Die Bearbeitung der nun digitalen Luftbilder umfaßte anschließend zwei ebenso in der analogen Luftbildauswertung gängige Verfahren, die Rektifizierung und die Erstellung von Orthophotos. Rektifizierung wird dabei die Prozedur genannt, die die Übertragung des Luftbildes auf eine Karte(nprojektion) mittels einer geometrischen, perspektivischen Transformation von Luftbildern umfaßt. Diese Transformation findet heutzutage typischerweise am Rechner mittels analytischer Verfahren unter Verwendung kartesischer Gleichungssysteme statt. Die Rektifizierung ist streng genommen nur in absolut flachem Gelände hinreichend. Bei der Abbildung eines Reliefs im Luftbild kommt es zusammen mit Maßstabsunterschieden in verschiedenen Höhen zu einer Radialverschiebung (siehe Abb. 3-1). Die Radialverschiebung entsteht durch die Zentralperspektive und Höhendifferenzen in einem Luftbild und bewirkt, daß topographisch höhere Punkte weiter zum Bildrand verschoben dargestellt werden als tiefere Punkte in der gleichen geographischen Position.

Zur Korrektur dieses Phänomens und zur Umrechnung in eine orthogonale Kartenprojektion wird für jeden Bildpunkt eine Höheninformation benötigt, die mit Hilfe des erstellten digitalen Geländemodells, wie in Kapitel 2.2 dargestellt, im Rasterformat ermittelt wurde.

Als Lösung stehen hier partielle Rektifizierungen und differentielle Rektifizierungen zur Verfügung. Bei der verwendeten letzteren Methode werden alle Bildelemente sukzessive, unter

Anpassung an eine vorliegende Höhe, rektifiziert. Für diese Methode ist also das Vorhandensein eines Geländemodells unbedingt erforderlich. BLACHUT & BURKHARDT (1989) beschreiben die analogen Methoden und mechanischen Apparaturen zur Rektifizierung und Erstellung von Orthophotos, wobei die Methoden heute mit digitalen Daten umgesetzt werden.

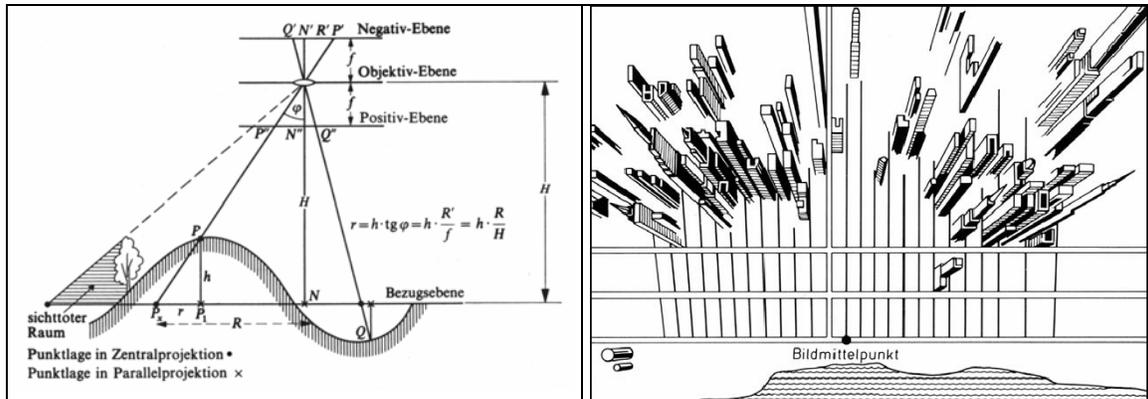


Abb. 3-1: Geometrie des reliefbedingten Lagefehlers im Luftbild (links, aus GIERLOFF-EMDEN & SCHROEDER-LANZ, 1970) und rechts ein Beispiel für daraus bedingte Lage- und Maßstabsveränderung im Luftbild (aus KRONBERG, 1985)

Weil das Aufnahmesystem Meßkammer/Flugzeug durch äußere Kräfte wie Wind, Ruderkorrekturen oder Beschleunigung verdriftet und verkantet wird, liegt es in den seltensten Fällen genau in der Orientierung, die für Senkrechtluftbildaufnahmen optimal ist, nämlich in Flugrichtung und orthogonal zum Lot orientierter Fokalebene des Aufnahmesystems. Die Abweichung von dieser Optimalorientierung werden durch die Rotationswinkel  $\omega$  (Querneigung),  $\varphi$  (Längsneigung) und  $\kappa$  (Verkantung) der Bildkoordinatenachsen gekennzeichnet und bewirken eine Grundrissverzerrung (siehe dazu Abb. 3-5). Diese Winkel bestimmen die äußere Orientierung des Luftbilds. Während der Rektifizierung des Luftbilds wird diese Grundrissverzerrung korrigiert.

Für die Rektifizierung der Luftbilder wurden aus der topographischen Kartenbasis 1 : 50.000 und aus GPS-Messungen im Gelände Soll-Koordinaten von insgesamt 283 Paßpunkten als Daten der äußeren Orientierung ermittelt und am Bildschirm den Bildkoordinaten zugewiesen. Ziel war die schließlich erfolgte Transformation der Bildkoordinaten in ein Weltkoordinatensystem mittels eines Polynoms ersten Grades analog der Bildtransformation bei den Satellitenbildern. Die Zuordnung der Grauwerte der neuen geometrisch korrigierten Bildmatrix geschah durch die Methode der nächsten Nachbarn (*nearest neighbour*). Die mittlere Transformationsgenauigkeit liegt bei etwa 50 m. Aus diesen nun georeferenzierten Luftbildern muß jedoch im Unterschied zu den Satellitenbilddaten auch der Einfluß der Radialverschiebung durch die Berücksichtigung des Reliefs korrigiert werden.

Die so gewonnen Ortholuftbilder konnten nun zu einem Orthophotomosaik zusammengefügt werden. Dies ist laut BLACHUT & BURKHARDT (1989) ein "Zusammenbau rektifizierter Luftbilder, die so orientiert und maßstäblich bearbeitet sind, daß sie eine zusammenhängende photographische Darstellung der Erdoberfläche bilden" (Abb. 3-2 sowie Tafel I). Dieses Verfahren wird Bündelblockausgleich genannt. Die Erstellung der Orthophotos und des Orthobildmosaiks fand mit dem Softwarepaket PCI/OrthoEngine V7.0 von PCI Geomatics statt. Dazu wurden in den Luftbildern zuerst die Rahmenmarken am Bildschirm eingemessen und somit der Bildhauptpunkt bestimmt. Auf diese Weise waren die Daten der inneren Orientierung bekannt und für die weitere digitale Bearbeitung verfügbar.

Bei dieser photogrammetrischen Triangulation wird die äußere Orientierung aller Luftbilder eines Luftbildblocks errechnet. Da die Werte der Rotationswinkel und die Lage des

Perspektivzentrums nicht bekannt sind, müssen sie aus Paßpunkten mit bekannten Koordinaten in allen drei Dimensionen ermittelt werden. Der Bündelblockausgleich beinhaltet dabei sowohl Translationen des Perspektivzentrums des Kamerasystems, als auch Rotationen der Bildebene, die so ausgeführt werden, daß alle von bekannten Paßpunkten ausgehenden Lichtstrahlen durch die korrekte Position in der Abbildungsebene und den Brennpunkt des Kamerasystems führen. Zusätzlich dazu wurde mittels insgesamt 1029 Paßpunkten zwischen den einzelnen Bildern, so genannten Rautenpunkten oder *Tie Points*, eine geometrische Bildtransformation durchgeführt. Bei der abschließenden Mosaikbildung fand auch eine Helligkeitsanpassung statt, bei der die Mosaiksnitte zwischen unterschiedlichen Orthobildern durch Zonen ähnlicher Helligkeit führen.

### 3.2 Satellitenbilddaten

#### 3.2.1 Bildstatistik

Satellitenbilddaten liegen als ein Feld von Bildelementen (*picture elements* oder vereinfacht auch Pixel genannt) mit zugeordneten digitalen Grauwertstufen mit einer charakteristischen statistischen Verteilung vor, die durch mehrere Parameter beschrieben werden kann. Die Kenntnis dieser Parameter ist für einige Bildoperationen und Anwendungen von Bildverarbeitungsmethoden zwingend erforderlich, so etwa bei der Dunstkorrektur. Daher wurden für die Satellitenbilddaten zunächst für die beiden verwendeten Szenen einzeln die statistischen Parameter der Grauwertverteilung ermittelt. Sie sind im Folgenden kurz dargestellt.

Das Bildmaximum/Bildminimum stellt die Extremwerte der im Bild vorkommenden Grauwerte dar. Eine Satellitenbildszene sollte idealerweise die gesamte zur Verfügung stehende Dynamik ausnutzen, das heißt die volle Bandbreite der zur Verfügung stehenden 256 Grauwerte. In der Praxis ist dies jedoch praktisch nie der Fall. Das Bildminimum ist der entscheidende Faktor für die Anwendung des verwendeten und weiter unten beschriebenen Dunstkorrekturverfahrens (*dark pixel subtract*, CRANE, 1971). Der Bereich zwischen Bildminimum und Bildmaximum kann, zusammen mit der Varianz, als ein Ausdruck des Bildkontrastes gesehen werden. Der Bildmittelwert stellt das arithmetische Mittel aller Grauwerte dar und ist ein Kennzeichen der Helligkeit des Bildes. Der arithmetische Mittelwert ist jedoch anfällig gegen Ausreißer, und es wird daher oft anstatt seiner der Medianwert bevorzugt, um eine Histogrammverteilung zu charakterisieren. Der Medianwert ist der 50 %-Wert einer Verteilung und ist eine robuste statistische Größe. Der Modalwert schließlich ist der Grauwert des Häufigkeitsmaximums.

Ein weiteres Charakteristikum einer Häufigkeitsverteilung ist die Streuung um den Mittelwert. Üblicherweise werden die Varianz und die Standardabweichung zur Beschreibung einer Verteilung herangezogen. Die Varianz ist dabei der Durchschnitt der Quadrate aller Abweichungen vom arithmetischen Mittelwert der Verteilung. Die Quadratwurzel der Varianz ist die Standardabweichung. Sie hat gegenüber der Varianz den Vorteil, daß sie in derselben Einheit wie die untersuchte Variable vorliegt. Bildmittelwert und Standardabweichung dienen zur Angleichung der Histogramme von Satellitenszenen zur späteren Mosaikbildung.

Die Bildstatistik der verwendeten Satellitenszenen zeigt Auffälligkeiten in der Verteilung der Grauwerte des VIS-Bereiches. Da, wie schon in Kapitel 2.3.2 dargelegt, die Streuung durch Aerosole im Kanal 1 (blau) am stärksten ist und mit zunehmender Wellenlänge abnimmt, sollte man erwarten, daß in Band 1 das Minimum der dargestellten Grauwerte bei einer höheren Grauwertzahl liegt als in den längerwelligeren Bändern. Genau der umgekehrte Fall trifft jedoch zu.

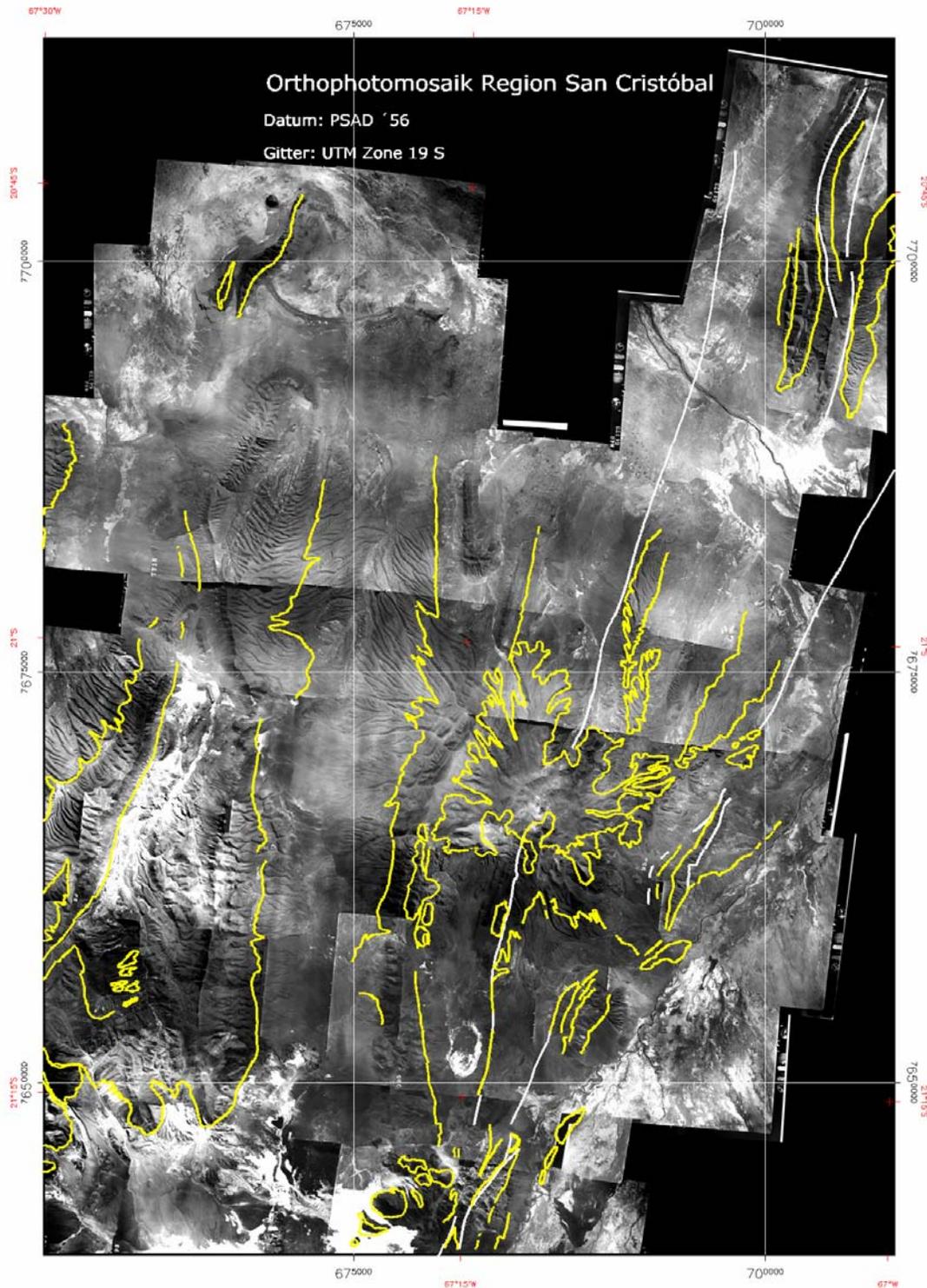


Abb. 3-2: Orthophotomosaik des Untersuchungsgebietes aus bolivianischen Luftbildern der Befliegung von 1964. In Gelb Formationsausbisse, die für die Erstellung des Modells genutzt wurden, in Weiß Störungen und vermutete Störungen (siehe auch Tafel I).

Band	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung	DN kumulativ > 0,01%
1	0	255	139.682572	85.739818	8
2	0	255	136.155176	86.170292	9
3	0	255	154.232546	81.112081	12
4	0	255	134.565240	79.746522	16
5	0	255	110.786634	51.032437	8
6 low	0	185	113.177498	38.516943	90
6 high	0	248	124.887443	49.702169	76
7	0	255	90.843664	45.470501	7
8	0	255	107.439549	70.089370	6

Tabelle 3-2: Bildstatistik der ETM 7+ Szene 233-074 vom 20.08.1999

Band	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung	DN kumulativ > 0,01%
1	0	255	78.624616	35.588564	8
2	0	255	75.467366	34.751507	9
3	0	255	100.241900	43.713163	12
4	0	255	80.844246	35.068758	13
5	0	255	88.931422	40.101966	9
6 low	0	175	121.148378	37.923406	79
6 high	0	229	139.338947	46.195961	55
7	0	255	80.464255	36.076918	8
8	0	255	59.236136	26.224610	4

Tabelle 3-3: Bildstatistik der ETM 7+ Szene 233-075 vom 20.08.1999

Dies kann durch mehrere Faktoren bedingt sein. Zum einen ist durch die große topographische Höhe des aufgenommenen Gebietes die überlagernde Luftsäule von deutlich geringerer Dicke als im Tiefland, so daß Streuungseffekte generell vermindert auftreten. Ein anderer Grund kann in dem weitgehenden Fehlen von Gewässern und dem Auftreten von Schlagschatten durch hohes Relief im Aufnahmegebiet liegen. Strahlung im VIS-Bereich und im nahen Infrarot wird von tiefen Gewässern absorbiert und kennzeichnet sich deshalb durch niedrige Grauwerte im Bild. Da im Satellitenbild dieser Region jedoch keine tiefen Gewässer auftreten, sondern nur flache Salztümpel, können die tiefsten Grauwerte nur aus Regionen mit Schlagschatten stammen. Diese Gebiete sind durch den hohen Sonnenstand jedoch ebenfalls klein und reflektieren deshalb einen relativ hohen Streulichtanteil aus der Umgebung. Nun ist es durchaus möglich, daß in den umliegenden Gebieten langwellige Strahlung in den Kanälen 3 und 4 stärker reflektiert wird als kurzwelligere Strahlung. Dies ist jedoch nur eine von vielen Erklärungsmöglichkeiten für die erhöhten Grauwerte in den Kanälen 3 und 4.

Ein etwas klareres Bild ergibt sich, wenn man die Histogramme der beiden Szenen betrachtet (Abb. 3-3 und 3-4). Aus diesen geht hervor, daß für Szene 233-074 für die Kanäle 5 und 7 ein starkes lokales Maximum bei Grauwerten um 10 herum, und für Szene 233-075 ein viel schwächeres, aber immer noch erkennbares lokales Maximum an dieser Stelle existiert. Szene 233-074 bildet in großem Umfang Salarflächen ab, 233-075 zeigt kleine Salarflächen. Salarflächen werden durch Pixel, die sehr niedrige DN in den Kanälen 5 und 7 aufweisen, sowie sehr hohe DN in anderen Kanälen im visuellen Spektrumsbereich, abgebildet. Die feuchtesten Gebiete, gar stehendes sehr flaches Wasser, etwa um die Mündung des Rio Grande in den Salar de Uyuni, weisen die niedrigsten DN in den Kanälen 5 und 7 auf. Damit wird die Vermutung nahegelegt, daß sehr flaches klares Wasser bzw. feuchtes Salz für die ungewöhnliche Histogrammform verantwortlich ist, denn Wasser absorbiert Strahlung im SWIR-Bereich (Kanäle 5 und 7), während Strahlung im visuellen Bereich das flache klare Wasser durchdringen kann und vom darunterliegenden hellen Salz gut reflektiert wird. Es kann jedoch keine Erklärung mit letzter

Sicherheit für diesen Effekt gegeben werden, zumal ein umfassendes Atmosphärenmodell nicht existiert.

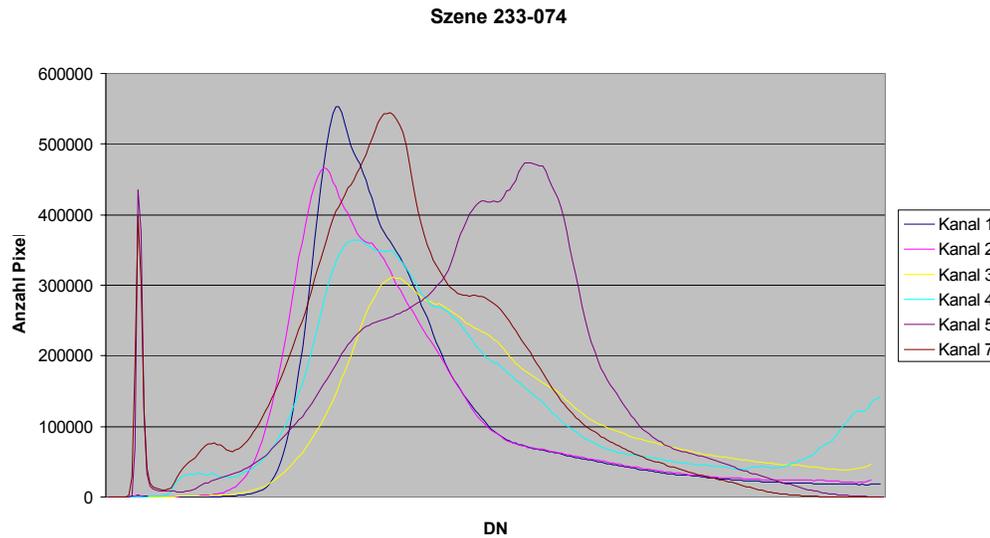


Abb. 3-3: Histogramm der Grauwerte (DN) für die multispektralen Kanäle (ohne thermale und panchromatische) der Landsat ETM7+-Szene 233-074. Deutlich erkennbar das lokale Maximum bei niedrigen DN in den SWIR Kanälen 5 und 7.

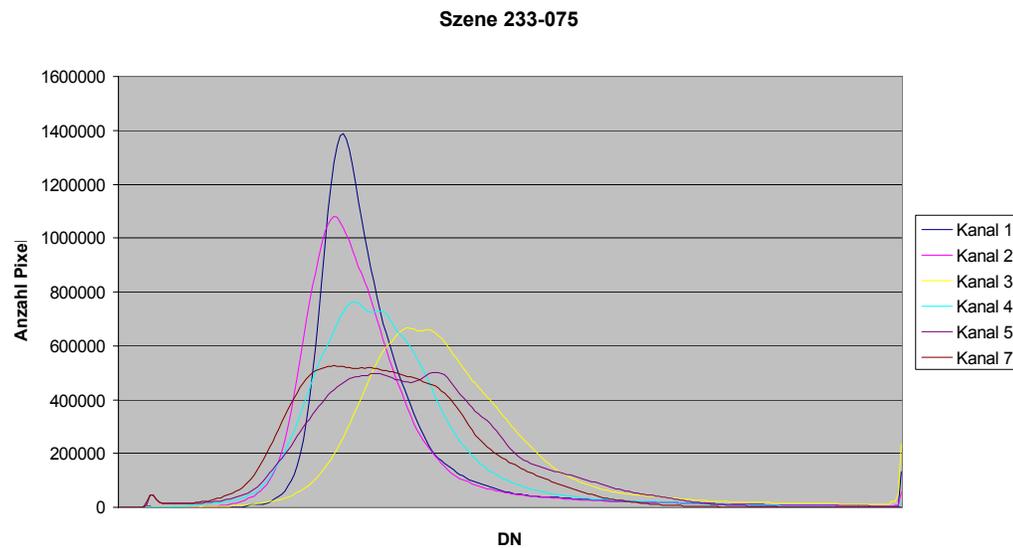


Abb. 3-4: Histogramm der Grauwerte (DN) für die multispektralen Kanäle (ohne thermale und panchromatische) der Landsat ETM7+-Szene 233-075. Ein lokales Maximum der Kanäle 5 und 7 bei niedrigen DN wie in Szene 233-074 taucht hier nur ganz untergeordnet auf.

### 3.2.2 RGB-Falschfarbenkompositen

Satellitenbilddaten liegen als Pixelfeld mit zugeordneten digitalen Werten (*digital numbers*, DN) in einem festgelegten Dynamikbereich vor, die einen Wert proportional zur Intensität der aufgenommenen elektromagnetischen Strahlung zugewiesen bekommen. Wie schon erwähnt, liegt dieser Dynamikbereich bei Landsat ETM 7 bei 8 bit, d.h. die DN können Werte zwischen 0 und 255 annehmen, wobei 0 die geringste und 255 die höchste Intensität darstellt.

Zur Visualisierung bietet sich die Kodierung dieser DN in Grauwerte an, so daß DN 0 mit Schwarz und DN 255 mit Weiß dargestellt wird. Die Zwischenwerte werden durch Grautöne dargestellt. Auf diese Weise kann ein Kanal einer Satellitenbildaufnahme dargestellt werden. Um mehrere Kanäle gleichzeitig abzubilden, muß eine Farbdarstellung erstellt werden.

Dabei werden zum Teil unterschiedliche Farbmodelle benutzt. Das gebräuchlichste ist das additive Farbmodell, das aus der Kombination der drei Grundfarben Rot, Grün und Blau (RGB) besteht. Durch additive Mischung dieser drei Primärfarben kann jede andere Farbe gemischt werden, inklusive Schwarz und Weiß. Je nachdem, welchen prozentualen Anteil die jeweiligen Grundfarben erhalten, ergibt sich ein anderer Farbton. Diesen Grundfarben werden für eine Falschfarbendarstellung einzelne Kanäle zugeordnet. Der Anteil der Grundfarben am resultierenden Farbton wird durch den Grauwert des eingesetzten Kanals bestimmt. Bei einem vollen Anteil in allen drei Grundfarben entsteht die Farbe Weiß, bei gar keinem Anteil in allen drei Farben Schwarz. Dieses RGB-Farbmodell hat den Vorteil, daß prinzipiell jedes skalierbare Bilddatenprodukt für eine Grundfarbe eingesetzt werden kann. Damit kann zum Beispiel auch ein Bildverarbeitungsprodukt eines der unten in Kapitel 3.3 beschriebenen Verfahren, prozentual skaliert, dargestellt werden. Dazu ist dann oft eine Anpassung des Datenbereichs auf die für die Darstellung zur Verfügung stehende Dynamik erforderlich.

Diese Farbdarstellung wird deshalb auch Falschfarbendarstellung genannt, da die dargestellten Daten meist nichts mit den natürlichen Farben des visuellen Spektrumsbereichs zu tun haben. Die RGB-Falschfarbendarstellung dient gewissermaßen nur als „Übersetzung“ der Bilddaten in eine für das Auge erfäßbare Farbe.

Ein anderes wichtiges Farbmodell ist der IHS (*Intensity Hue Saturation*) Farbraum. In ihm wird Farbe nicht als Mischung aus drei Grundfarben definiert, sondern durch den Farbton (*Hue*) als vordefinierten Wert, in Kombination mit einem Wert für die Sättigung (*saturation*) und einem für die Helligkeit (*intensity*). Die Sättigung beschreibt dabei den Anteil von Grau im Farbgemisch, Sättigung 0 bedeutet, daß gar keine Farbe, sondern nur ein Grauton dargestellt wird. Die Helligkeit beschreibt die Lage des Farbtons auf einer Skala von Weiß bis Schwarz, zusätzlich zu der durch die Sättigung bestimmten Chromatizität. Dieses Farbmodell hat eine Bedeutung für weitergehende Bildverarbeitungsschritte wie etwa den IHS-merge zur Verbesserung der räumlichen Auflösung durch höher aufgelöste panchromatische Kanäle (siehe dazu Kapitel 3.3.2).

### 3.2.3 Bildkorrektur

Die Bildkorrektur kann untergliedert werden in:

- geometrische Korrektur
- radiometrische Korrektur
- atmosphärische Korrektur

Die geometrische Korrektur beschäftigt sich mit dem Einfluß systematischer und unsystematischer Verzerrungen und der Zuordnung der Bilddaten zu einem geographischen Koordinatensystem. Die radiometrische Korrektur beschäftigt sich mit dem Einfluß des Sonnenstandes, sowie dem Winkel zwischen aufgenommenem Gelände und Sensor. Die atmosphärische Korrektur wiederum beschäftigt sich mit der Unterdrückung von Streueffekten, dem die elektromagnetische Strahlung beim Durchgang durch die Atmosphäre unterliegt. Digitale Bilddaten liegen als Bildelemente (*picture elements*, sogenannten Pixel) mit einem Grauwert vor, die in einem regelmäßigen Feld bestehend aus Zeilen und Spalten angeordnet sind. Jedem Pixel wird ein numerischen Wert, der Grauwert (*digital number*, DN) zugeordnet, der direkt abhängig von der Intensität der aufgenommenen Elektromagnetischen Strahlung ist. Der Datenumfang, ausgedrückt in bit, der dabei für jedes Pixel zur Verfügung steht, wird radiometrische Auflösung genannt. Beim Landsat-System stehen zum Beispiel 8 bit zur Verfügung, das bedeutet, daß die Grauwerte von 0 bis 255 reichen können ( $2^8 = 256$  Werte).

Aufgenommen werden in einem Satellitensystem die Pixel jedoch ohne geographische Zuordnung zu einer Kartendarstellung. Aufgabe der geometrischen Korrektur ist es, die Bildkoordinaten in geographische Landeskoordinaten zu transformieren und zu projizieren. Dazu wird ein neues Datengitter in der jeweiligen Projektion erstellt, das mit Bildelementen gefüllt wird. Die Grauwerte dieser Bildelemente können durch verschiedene Interpolationsmethoden aus den Eingangsdaten errechnet werden. Außerdem werden den entsprechenden Bildelementen Koordinaten zugeordnet.

Die geometrische Korrektur ist notwendig, um eine vergleichbare Datenbasis im GIS zu erlangen und ist Grundvoraussetzung für alle geometrischen Operationen in einem GIS. Auf der anderen Seite werden die Bilddaten bei der Entzerrung manipuliert, sie sind also gegenüber den Originaldaten durch Interpolation verändert, was zu Abstrichen bei der Aussagefähigkeit von Bildverarbeitungsprodukten führt.

Vor der Bildkorrektur wurde jedoch die Mosaikbildung durchgeführt, da die verwendeten ETM 7-Szenen vom gleichen Aufnahmedatum her auch identische Bildeigenschaften bezüglich atmosphärischer Verhältnisse, Vegetation, Geometrie usw. haben. Dieser Vorteil ginge durch vorherige Bildkorrektur verloren. Die Einteilung in Szenen ist an sich willkürlich, da das Landsat-System kontinuierlich Bildzeilen aufnimmt. Insofern konnten die beiden übereinanderliegenden Szenen einfach ohne Histogrammangleichung "zusammengesteckt" werden. Die Bildkorrektur wurde anschließend an der fusionierten Szene durchgeführt.

### 1. Geometrische Korrektur

Zur geometrischen Korrektur müssen systematische und unsystematische Fehler in der Bildaufnahme korrigiert werden. Dazu bietet SABINS (1997) einen Überblick über diese Fehler. Die systematischen Fehler sind in dem vorliegenden Satellitenbilddatensatz schon entfernt worden. Dabei handelt es sich um die Panoramaverzerrung durch die Erdkrümmung, die nach BAUER (1994) bei einer Landsat-ETM-Szene von nominal 185 km Kantenlänge etwa 670 m beträgt. Ebenfalls berücksichtigt worden ist die Variation der Rotationsgeschwindigkeit des Spiegels während des Abtastvorgangs. Schließlich rotiert die Erdoberfläche während des Scanvorgangs, und dies unterschiedlich schnell, abhängig vom Breitengrad, über dem sich das Aufnahmesystem gerade befindet.

Die nichtsystematischen Fehler umfassen die reliefbedingte Lageverschiebung von Punkten analog zur Radialverschiebung, sowie Einflüsse durch Änderungen der Geschwindigkeit, Fluglage, -höhe und Kursabweichungen des Aufnahmesystems. Eine Georeferenzierung der Satellitenbilddaten ist deshalb nötig, um diese Fehler zu eliminieren und das Bild in eine Kartenprojektion zu überführen. Eine Zusammenstellung der Einflüsse der äußeren Orientierung des Aufnahmesystems auf die Geometrie des Bildes gibt Abb. 3-5.

Die Georeferenzierung der Satellitenbilddaten wie auch der gescannten Luftbilddaten geschah mit Hilfe von Paßpunkten, die teils aus direkten GPS-Messungen im Gelände ermittelt wurden, teils wurden sie aus den topographischen Karten 1 : 50.000 der Region entnommen und ausgewählt. Als Koordinatensystem wurde das UTM (Universal Transversal Mercator) System gewählt, mit dem Kartendatum Provisorial South American von 1956 und dem International-1909 Ellipsoid, da dies auch in der topographischen Karte verwendet wird. Das UTM-System ist eine konforme zylindrische Projektion, die formtreu, nicht jedoch längentreu ist. Das System ist in 60 Zonen untergliedert, die durch eine Ausdehnung von  $\pm 3^\circ$  um Zentralmeridiane herum, beginnend mit der Datumsgrenze ostwärts, definiert sind (HAKE, 1982). Das Arbeitsgebiet, ebenso wie die beiden verwendeten Satellitenszenen, liegt in der UTM-Zone 19 mit dem Mittelmeridian  $066^\circ$  W.

Vor der eigentlichen Georeferenzierung wurden aus den beiden verwendeten Satellitenszenen ein Mosaik pixelweise erstellt. Dies war deswegen gut durchführbar und erwünscht, weil die beiden

Szenen direkt hintereinander bei dem selben Überflug von Landsat ETM 7 aufgenommen wurden und deshalb keine Unterschiede im Kontrast zwischen den Aufnahmen zu erwarten war. So war keine Histogrammanpassung zwischen beiden Szenen nötig. Außerdem passen beide Szenen geometrisch genau zusammen und eine Mosaikbildung auf Pixelebene vor der Anwendung geometrischer Korrekturverfahren ist deshalb angebracht.

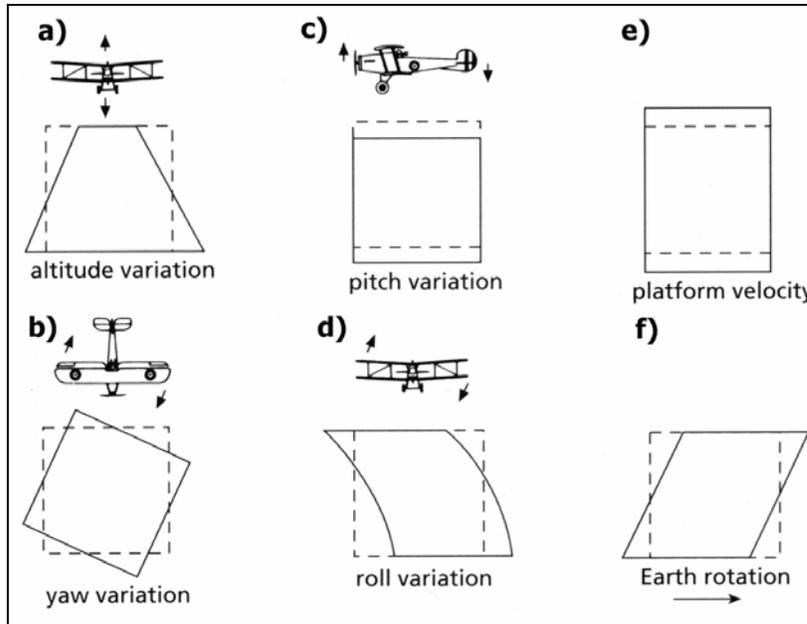


Abb. 3-5: Verzerrungen im Grundriss bei Flugrichtung von oben nach unten durch Abweichungen der äußeren Orientierung: Höhenänderung (a), Verkantung (Winkel  $\kappa$ , b), Längsneigung (Winkel  $\varphi$ , c), Querneigung (Winkel  $\omega$ , d), Sensorgeschwindigkeit (e) und Erdrotation (f). Aus DRURY (1993).

Alle Landsat-ETM-Kanäle, mit Ausnahme des Kanals 6, der die emittierte Infrarotstrahlung erfaßt, wurden durch die gleichen Paßpunkte georeferenziert, was für den später durchgeführten und erläuterten *IHS-merge* mit dem in einer höheren räumlichen Auflösung vorliegenden panchromatischen Kanal wichtig ist. Zur Georeferenzierung wurden in den Szenen 233-074 und 233-075 über 100 Paßpunkte bestimmt. Darin eingeschlossen sind 14 durch GPS-Empfänger direkt im Gelände eingemessene Paßpunkte. Als Paßpunkte dienen in der Regel sowohl im Luftbild und Satellitenbild als auch im Kartenmaterial eindeutig lokalisierbare Punkte. Als Kartenmaterial konnte durchgehend auf die topographische Karte Boliviens 1 : 50.000 zurückgegriffen werden.

Die Güte der Anpassung wird über den sogenannten RMS-Fehler (*root mean square error*) beschrieben. Dieser Fehler stellt den absoluten Wert (Wurzel des Quadrats) der Lageabweichung eines Paßpunktes vom zur Transformation eingesetzten Polynom dar. Er liegt für die verwendeten 59 Paßpunkte bei 2,0011 Pixel in den multispektralen Kanälen (entspricht 60 m). Einzelne weniger geeignete Paßpunkte können den RMS einer Transformation signifikant erhöhen, so daß sie in diesem Fall nur die 59 günstigsten der etwa 100 eingemessenen berücksichtigt werden.

Bei der Koordinatentransformation von Pixelkoordinaten zu geographischen Koordinaten können Polynome erster bis  $x$ -ter Ordnung verwendet werden. Es wurde dabei ein Polynom erster Ordnung ausgewählt, da Polynome höherer Ordnung durch Extrapolation ein unrobustes Verhalten vor allem an den Bildrändern zeigen, was dort durch nichtlineare Gleichungen zu starken Verzerrungen führen kann. Im Zuge der Koordinatentransformation wird eine Bildmatrix erzeugt, die in Pixelgröße und Orientierung der ausgewählten Kartenprojektion entspricht. Diese Bildmatrix muß nun Pixel für Pixel mit dem entsprechenden Bildinhalt an Grauwerten gefüllt werden.

Dieser zweite Schritt bei der Georeferenzierung ist das sogenannte *resampling* oder Registrierung. Durch die Rotationen und Translationen bei der Koordinatentransformation liegen die Bildpixel nicht mehr geographisch genau über den entsprechenden Punkten der Bildmatrix.

Zur Ermittlung der Grauwerte der neu eingeordneten Pixel stehen mehrere Methoden zur Auswahl. Die *nearest-neighbour*-Methode (im deutschen Sprachraum auch Methode der nächsten Nachbarn genannt) übernimmt dabei den Grauwert des nächstgelegenen Pixels für den neuen Grauwert. Bei der bilinearen Interpolation und der *cubic-convolution*-Methode wird der neue Grauwert über einen mehr oder weniger großen Nachbarschaftsbereich durch Mittelwertbildung ermittelt. Dies hat die Wirkung eines Glättungsfilters und verändert demnach die Bildstatistik und die räumliche Variabilität der Grauwerte. Deshalb sind diese Methoden für die weiterführende Bildverarbeitung hinderlich, hauptsächlich bei der Durchführung von digitalen Klassifizierungen, weniger bei der Lineamentinterpretation. Um jedoch die anderen Bildverarbeitungsoperationen nicht zu beeinflussen, wurde die *nearest-neighbour*-Methode gewählt.

### 2. Einfache Atmosphärenkorrektur

Aus Kapitel 3.3.2 geht hervor, daß die Atmosphäre die durchgehende elektromagnetische Strahlung streut, besonders im kurzwelligen Bereich. Speziell die Rayleigh-Streuung bewirkt eine unerwünschte Kontrastverminderung der Bilddaten und muß daher korrigiert werden. Theoretisch ist es möglich, eine absolute Atmosphärenkorrektur durchzuführen, dazu müssen jedoch die verschiedensten atmosphärischen Parameter wie Temperatur, Luftdruck, -feuchte, Aerosolkonzentrationen, etc... zum Aufnahmezeitpunkt flächendeckend und in hoher Dichte vorhanden sein, was leider in den seltensten Fällen gegeben ist, schon gar nicht in entlegenen Gegenden wie im Altiplano. CRIPPEN *et al.* (1988) geben einen Überblick über die gängigsten einfachen Korrekturverfahren zur Entfernung des atmosphärischen Effektes.

Eine der einfachsten und gängigsten Methoden ist die sogenannte Dunstkorrektur, auch *dark-pixel-subtract* genannt (CRANE 1971). Hintergrund ist die Annahme, das in jeder Aufnahme mindestens ein Pixel mit dem Grauwert 0 existieren sollte, sei es durch Abschattung oder vollständige Absorption der Strahlung, zum Beispiel durch tiefes, klares Wasser. Deshalb wird der Einfluß der über die Szene als homogen angenommenen atmosphärischen Streuung als die Differenz zwischen dem Grauwert 0 und dem kleinsten in der Szene vorkommenden Grauwert, also dem Bildminimum, angenommen. Dieser Wert ist durch die Wellenlängenabhängigkeit der Rayleighstreuung für jeden Kanal verschieden und muß deshalb für jeden Kanal einzeln aus dem Histogramm abgelesen werden. Die eigentliche Korrektur besteht darin, diesen Wert gleichförmig von allen Grauwerten des Kanals abzuziehen.

Die Bildminima der verwendeten Satellitenszenen sind in den Tabellen 3-2 und 3-3 nachzulesen.

### 3. Kontrastverstärkung

Um einen möglichst hohen Bildkontrast zu erzeugen, ist es notwendig, die gesamte Breite der hier zur Verfügung stehenden 8-bit dynamischen Auflösung mit 256 Grauwerten zu nutzen. Verschiedene Streckungsverfahren sind anwendbar, die lineare Streckung gibt jedoch die Originaldaten am treuesten wieder. Oft wird durch die 256 Grauwerte nur ein geringerer Wertebereich, zum Beispiel der von 98% aller um den Mittelwert herum streuenden Grauwerte umfassenden Daten, dargestellt (Abb. 3-6). Zweck bei dieser Methode ist es, Ausreißer oder stark reflektierende Flächen zu unterdrücken. Eine etwas aufwendigere Methode ist die abschnittsweise lineare Streckung, bei der einzelne Abschnitte der kontinuierlichen Grauwertfunktion unterschiedlich stark gestreckt werden. Diese Methode ist für bi- und multimodale Verteilungen geeignet, jedoch auch mit höherem Arbeitsaufwand verbunden. Zudem ist das Setzen der Abschnittsgrenzen von subjektiven Parametern abhängig und somit von Bearbeiter zu Bearbeiter unterschiedlich. Da für diese Untersuchung nur die anstehenden Gesteine betrachtet wurden, war eine komplizierte Streckung, die sowohl die sehr hellen evaporitischen Holozänsedimente als auch die tertiären Rotsedimente und Vulkanite hervorhebt, nicht nötig. Eine weitere, ähnlich

zeitaufwendige, Methode ist zum Beispiel die nutzerdefinierte lineare Streckung (KENE, 1997), die als Parameter den Wertebereich des Inputs und den arithmetischen Mittelwert nutzt. Nichtlineare Streckungsmethoden sind etwa die logarithmische, Gauss-verteilte oder die quadratische Streckung. Diese zeigen jedoch keine zufriedenstellende Dynamik in ihrer Ausgabe. Für das Arbeitsmosaik wurde deshalb die lineare Streckung der 98% um den Mittelwert streuenden Grauwerte gewählt. Diese gestreckten Bilddaten sind die Grundlage der visuellen Bildinterpretation von Einzelkanalbildern und Farbkompositen.

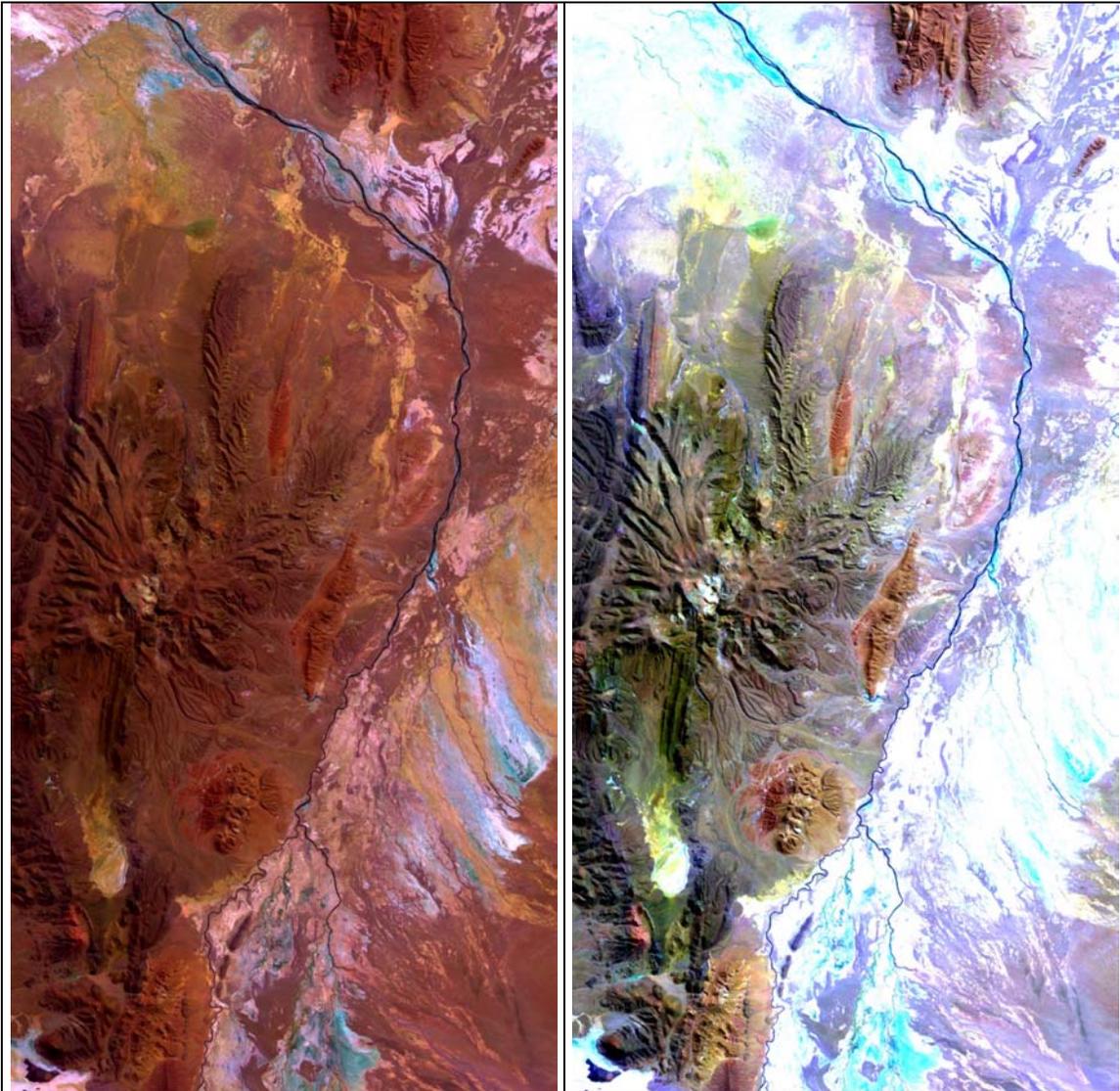


Abb. 3-6: Vergleich zwischen ungestrecktem (links) und linear gestrecktem Satellitenbildausschnitt (rechts, lineare Streckung mit 2%)

### 3.3 Weitergehende Bildverarbeitung

Aus dem so gewonnenen Bildmosaik wurde das Arbeitsgebiet als Teilgebiet herausgeschnitten (Abb. 3-7 und Tafel II). An diesem Datensatz wurden anschließend weitergehende Bildverarbeitungsoperationen durchgeführt, die alle auf eine verbesserte Bilddarstellung für die visuelle Interpretation von Lineamenten und geologischen Diskontinuitäten abzielen.

### 3.3.1 Quotientenbilder (Farbratios)

Die Erstellung von Ratiobildern ist eine gängige Bildverbesserungsmethode in geologischen Anwendungen der Fernerkundung. Mittels Ratiobildern können spektrale Anomalien in einer Satellitenaufnahme hervorgehoben werden. Ratiobildung besteht in der Division der Grauwerte eines Bildes (Kanals) durch die eines zweiten Bildes (oder Kanals). Dazu werden die Grauwerte von Kanälen, die für eine bestimmte spektrale Eigenschaft sehr sensitiv sind, in den Zähler gestellt, während im Nenner idealerweise Grauwerte von Kanälen gesetzt werden, die auf die spektrale Eigenschaft des untersuchten Objektes nicht ansprechen.

Der Vorteil von Ratiobildern liegt darin, daß der Quotient der Grauwerte zweier Kanäle helligkeitsunabhängig ist und somit Helligkeitsvariationen nicht mehr die spektralen Eigenschaften eines Objektes beeinflussen. Helligkeitsvariationen entstehen in Satellitenbildaufnahmen durch die unterschiedliche Exposition und die sich daraus ergebende veränderte spektrale Reflexion der Erdoberfläche in Bezug zur Sonne, der Quelle der gemessenen elektromagnetischen Strahlung. So können subtile spektrale Unterschiede in Bildobjekten unterschieden werden, die sonst durch Helligkeitsvariationen maskiert würden (GILLESPIE *et al.*, 1987). Die Exposition wird durch das Relief bestimmt, und enthält somit auch geologische Information, ist also deshalb wichtig. Bei der reinen Betrachtung der Lithologie ist der Effekt des Reliefs eher störend.

Hierin liegt ein Nachteil der Ratiobildung. Durch die geringe Hervorhebung von Flächen mit ähnlichen spektralen Eigenschaften werden Albedodifferenzen unterdrückt, was die Interpretierbarkeit erschweren kann. Ein weiterer Nachteil der Ratiobildung ist das verschlechterte Signal-Rausch-Verhältnis (GEERKEN & KAUFMANN, 1991). Außerdem muß darauf geachtet werden, daß die Ratiobildung nach der atmosphärischen Korrektur erfolgt, da die Streuung durch atmosphärische Einflüsse wellenlängenabhängig, und somit von Kanal zu Kanal verschieden, ist, was verschlechternde Effekte bei der Ratiobildung zur Folge hat.

Die Unterdrückung von topographischen Effekten und Albedodifferenzen kann jedoch durch Bildverarbeitungsschritte rückgängig gemacht werden. Dabei wird ein Ratiokompositenbild in den IHS-Farbraum transformiert und die Intensitätskomponente durch ein gestrecktes und evtl. kantengeschärftes Bild ersetzt. Nach Rücktransformation in den RGB-Farbraum enthält das Farbkomposit jetzt ebenfalls Albedo- und topographische Information, bei Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses.

Bei der Erstellung von Ratiobildern kann zwischen nicht angepaßten und angepaßten Ratios unterschieden werden (CRIPPEN *et al.*, 1988). Erstere beziehen sich auf Ratiobildungen aus Daten, an denen keine atmosphärische Korrektur durchgeführt wurde, letztere auf Ratios aus Daten, die atmosphärisch korrigiert wurden. Angepaßte Ratios enthalten durch die Kontrastverstärkung atmosphärischer Korrekturverfahren wie zum Beispiel der Dunstkorrektur eine größere spektrale Information (CRANE, 1971, CRIPPEN, 1988). In dieser Untersuchung wurden ausschließlich angepaßte Ratiobilder erstellt, die jedoch die topographischen Informationen und Albedovariationen nicht in dem Maße wie nicht angepaßte Ratiobilder enthalten.

Bei geologischen Fragestellungen in Gebieten ohne signifikante Vegetationsbedeckung ist die mineralgruppenspezifische spektrale Reflexion zur Unterscheidung von Gesteinstypen und ihrer spektralen Eigenschaften von Bedeutung. In der Literatur gibt es eine große Anzahl von Angaben über verwendbare Ratios aus der Auswahl der 30 möglichen Ratios des Landsat-Systems. Ausgehend von einer geologischen Fragestellung sind dabei mehrere Ratios interessant. So sind Eisenanomalien besonders gut in den Ratios 3/1 und 5/1 zu erkennen (SABINS, 1997; DRURY, 1993). Dies liegt daran, daß für  $\text{Fe}^{2+}$  der Wellenlängenbereich des Absorptionsmaximums bei  $0,35 \mu\text{m}$ , für  $\text{Fe}^{3+}$  bei  $0,5 \mu\text{m}$  liegt, ein Reflexionsmaximum von eisenhaltigen Mineralen jedoch bei  $0,65 \mu\text{m}$ . Dies entspricht jeweils den TM-Kanälen 1 und 3. Ein weiteres Eisenreflexionsband liegt im Bereich des TM-Kanals 5, ein weiteres Absorptionsband im Bereich des TM-Kanals 4. Somit läßt sich auch die Ratio 5/4 zur

Erkennung Fe-reicher Oberflächen heranziehen. Charakteristische Absorptionsverhalten zeigen auch Al-OH und Mg-OH-Gruppen. Die Absorptionsbereiche liegen zwischen 2,1 und 2,24  $\mu\text{m}$ , was dem TM-Kanal 7 entspricht. TM-Kanal 5 wiederum zeigt eine generell hohe Reflektanz für alle Minerale. Somit eignet sich die Ratio 5/7 zur Hervorhebung von Gesteinen mit hohem Ton- bzw. Schichtsilikatanteil, wie etwa auch alterierte Gesteine. Ein Beispiel für eine Darstellung solcher Ratios ist im Kapitel 6 in Abb. 6-2 gezeigt.

### 3.3.2 IHS-Transformation

Die IHS-Transformation (*Intensity, Hue, Saturation*) wurde nur an den Satellitenbilddaten durchgeführt. Die IHS-Transformation gehört zu den Standardwerkzeugen der Bildverbesserung und soll generell den Kontrast von hoch korrelierten Spektralkanälen verbessern. Dabei wird ein Kompositenbild aus dem RGB-Farbraum in den IHS -Farbraum übertragen. Der RGB-Farbraum stellt die Kanäle im Komposit als additive Grundfarben in Rot, Grün und Blau dar. Der IHS-Farbraum hingegen benutzt die Größen Intensität (*Intensity*) von Schwarz bis Weiß, Farbton (*Hue*) entsprechend der Wellenlänge (auch Chroma genannt) und Farbsättigung (*Saturation*) von Grau bis Vollton.

Die einzelnen Komponenten des IHS-Farbraums können dann gestreckt und anderweitig verändert werden. Eine Streckung der Intensitätskomponente entspricht dabei einer Kontrastverstärkung im RGB-Farbraum, während die Streckung der Sättigungskomponente Farben deutlicher herausstellt. Eine Streckung des Farbtons verschiebt die Farbtöne und verändert das allgemeine Erscheinungsbild des Kompositenbildes, ist also zu vermeiden.

Die so gestreckten Daten werden anschließend wieder in den RGB-Farbraum zur weiteren Bearbeitung rücktransformiert.

Die IHS-Transformation ermöglicht jedoch in Kombination mit einem hochauflösenden panchromatischen Kanal noch eine weitere Bildverbesserung. Ein panchromatischer Kanal wie bei Landsat ETM 7+ deckt in seiner Abtastung den Wellenlängenbereich mehrerer Multispektralkanäle ab, in diesem Fall der Kanäle 2, 3 und 4. Wenn ein RGB-Farbkomposit aus diesen drei Kanälen bestehend in den IHS-Farbraum überführt wird, so kann die Intensität direkt mit dem panchromatischen Kanal gleichgesetzt werden. Die Kanäle der Farbton- und Sättigungskomponenten gröberer räumlicher Auflösung müssen nun nur noch auf die Pixelgröße des panchromatischen Kanals durch *resampling* umgerechnet und die Intensitätskomponente durch den panchromatischen Kanal ersetzt werden. Anschließend liegt ein Farbkompositenbild in der räumlichen Auflösung des panchromatischen Kanals vor, das abschließend in den RGB-Farbraum zurücktransformiert wird.

Dieser sogenannte *IHS-merge* kann streng genommen nur bei multispektralen Kanälen angewendet werden, die mit dem Wellenlängenbereich des panchromatischen Kanals zur Deckung kommen, jedoch sind auch mit anderen Kanälen gute Resultate erzielbar (MUNIER & GONI, 2000). Mehrere Sensorplattformen unterstützen inzwischen dieses Verfahren durch das Vorhandensein eines panchromatischen Kanals, so zum Beispiel SPOT, Landsat ETM 7+, IKONOS, HRSC-A und IRS-1C/D.

Die IHS-Transformation sorgt somit für einen besseren spektralen Kontrast bei satteren Farben und einer höheren räumlichen Auflösung. Nachteile liegen in ihrer Beschränkung auf drei Kanäle. Angewendet wurde die IHS-Transformation auf ein Farbkompositenbild der Kanäle 7, 4 und 1 RGB unter Austausch der Intensitätskomponente durch den Kanal 8 (pan). Ein Beispiel hierfür zeigt die Abbildung auf Tafel II des Untersuchungsgebietes und seiner Umgebung (Abb. 3-6).

### 3.3.3 Hauptkomponententransformation

Ein Problem bei der Interpretation multivariater Daten ist die Redundanz der Daten untereinander. Dies ist auch bei multispektralen Satellitenbilddaten der Fall, so besteht zum Beispiel eine hohe Redundanz zwischen den Kanälen 1, 2 und 3. Die Hauptkomponentenanalyse

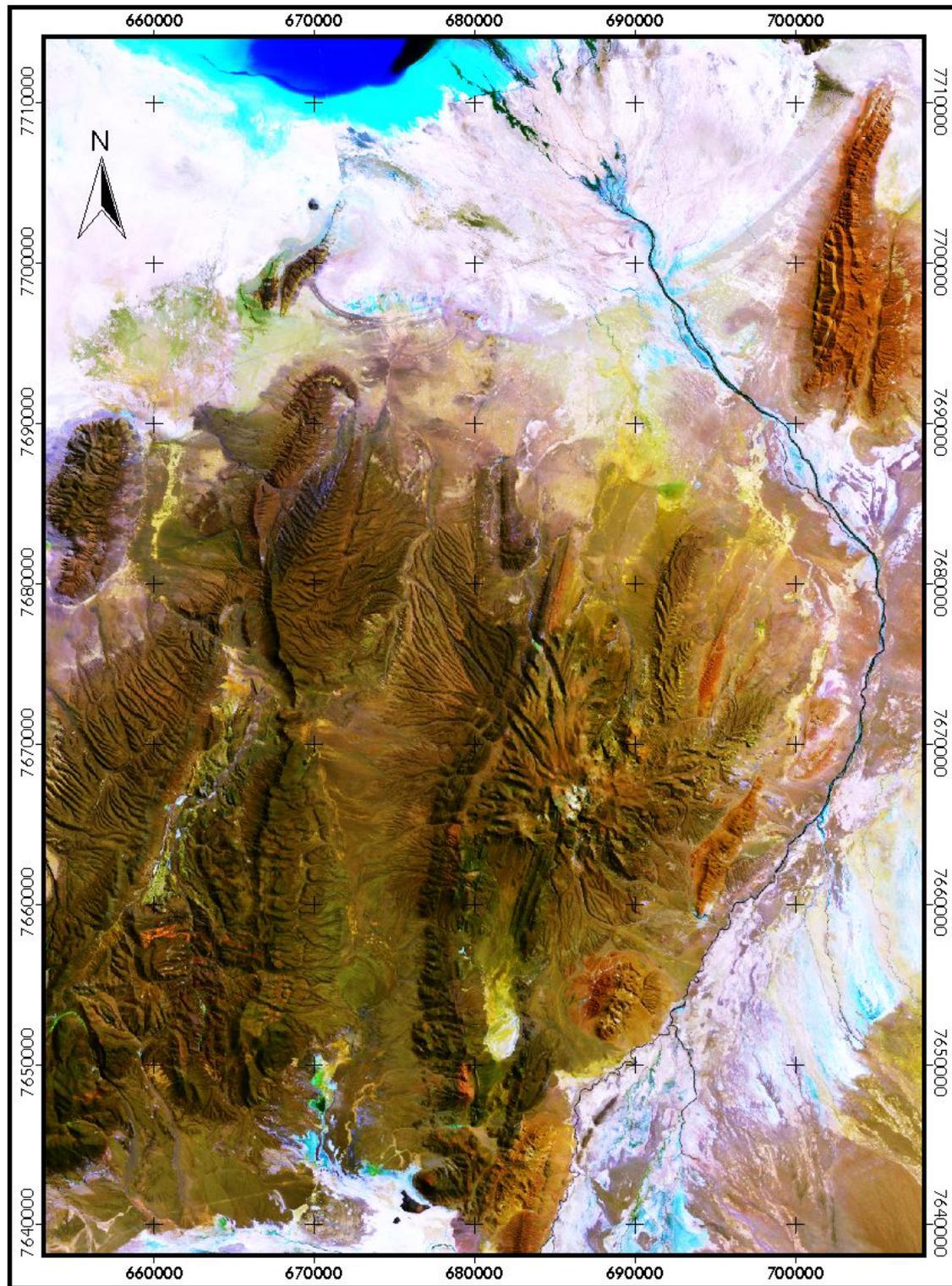


Abb. 3-7: Landsat ETM-7+ Mosaik des Untersuchungsgebietes in den Kanälen 7 4 1 R G B. An diesem Bild wurde der IHS-merge, sowie eine einfache Atmosphärenkorrektur durchgeführt.

(HKA), oder auf englisch *Principal Component Analysis* (PCA), ist eine Möglichkeit zur Reduzierung der Redundanz. Dabei werden aus Kovarianzmatrizen oder Korrelationsmatrizen der verschiedenen Spektralkanäle Eigenmatrizen gebildet, mit Hilfe derer multispektrale Daten in ein neues Koordinatensystem rotiert werden, das seine Koordinatenachsen entlang der größten Varianzen hat. Die Richtung, in der die größte Varianz auftritt, stellt die erste Hauptkomponente (HK) dar und wird mit einem Eigenvektor und einem Eigenwert beschrieben. Die zweite Hauptkomponente wird aus den Residuen der ersten HK senkrecht zu dieser berechnet. Dies hat zur Folge, daß die erste HK den Großteil der Gesamtvarianz des multispektralen Datensatzes beinhaltet, während die folgenden HK immer kleinere Anteile an der Varianz darstellen. Vorteil ist, das die einzelnen HK nur von der verwendeten Satellitenszene abhängen und untereinander vollkommen unkorreliert sind (z. B. SINGH & HARRISON, 1985 und GILLESPIE *et al.*, 1986).

Für die Fernerkundung gibt KENEA (1997) eine Zusammenfassung der Anwendungsmöglichkeiten unstandardisierter und standardisierter HKA und ihres Nutzens für die Diskriminierung geologischer Einheiten. Die Unterscheidung zwischen standardisierter und unstandardisierter HKA ist von Bedeutung, weil zwischen den Spektralkanälen typischerweise Unterschiede in der Varianz innerhalb des Kanals auftreten. Diese Varianzunterschiede machen sich bei der Nutzung einer Kovarianzmatrix in der unstandardisierten HKA durch eine unterschiedliche Wichtung der Kanäle bemerkbar (SINGH & HARRISON, 1985). Durch die Nutzung von Korrelationskoeffizienten bei der standardisierten HKA werden die eingehenden Spektralkanäle gleichmäßig gewichtet. Dabei zeigte sich, daß sich dafür die standardisierte HKA unter Verwendung einer Korrelationsmatrix besser eignet als eine unstandardisierte.

Für die Interpretation wurde ein Hauptkomponentenbild aus den 6 multispektralen Kanälen des Landsat ETM 7+ Systems herangezogen, siehe dazu Abb. 6-3.

### 3.3.4 Dekorrelierungsstreckung der Hauptkomponenten

Wie schon in 3.3.3 erwähnt, wird bei der HKA der Merkmalsraum entlang neu berechneter Koordinatenachsen aufgespannt. In diesem Zustand können die Daten ebenfalls gestreckt werden. Die Daten werden anschließend in das ursprüngliche Koordinatensystem zurücktransformiert, was auch als Inverse HKA bekannt ist (WILLIAMS, 1983). Ähnlich der IHS-Dekorrelierung findet hierbei eine Dekorrelierung der Daten mit dem Resultat einer verbesserten Farbauflösung statt. Gegenüber der normalen HKA hat dieses Verfahren den weiteren Vorteil, daß das Rauschen der höheren HK nicht mehr auftaucht.

Die Anwendung dieses Verfahrens auf die Bilddaten zeigte jedoch, daß keine signifikante Verbesserung der Unterscheidbarkeit geologischer Information erzielt wurde.

### 3.3.5 Texturfilter

Texturfilter gehören wie die Hoch- und Tiefpassfilter zu den lokalen Operatoren. Textur ist dabei laut MATHER (1999) ein "Maß für die Homogenität der Nachbarschaft eines Pixels". Textur ist dabei eine skalenabhängige Größe und deshalb nur begrenzt auf andere Datensätze anwendbar, so zum Beispiel den höher aufgelösten panchromatischen Kanal. Ein weiterer Parameter ist die Größenordnung der zu erkennenden Struktur, die wiederum die Größe des Filterfensters bestimmt, in dem die textuellen Eigenschaften berechnet werden.

Ein Filter kann als ein rechteckiges, über das Bild gleitendes Fenster in Form einer Matrix verstanden werden, in dem eine arithmetische Operation der Grauwerte der in dem Fenster enthaltenen Pixel durchgeführt wird. Die Parameter dieser Operation werden durch die Werte in der Konvolutionsmatrix definiert. Während der Konvolution wird dem zentralen Pixel der aus den Grauwerten der in dem Fenster gelegenen Pixel und der Konvolutionsmatrix errechneten Werte zugewiesen und in eine neue Datei geschrieben. Das Filterfenster wird nun pixelweise über das gesamte Bild geschoben (siehe Abb. 3-8).

Die Homogenität in der Nachbarschaft eines Pixels kann durch mehrere Parameter beschrieben werden. Es sind dies hauptsächlich die für eine Verteilung typischen Parameter wie Varianz,

Schiefe, Steigung oder Median und Mittelwert. Im letzten Fall haben wir einen Tiefpassfilter vorliegen, so daß dieser auch als Spezialfall eines Texturfilters angesprochen werden kann. Abbildung 3-9 zeigt beispielhaft die Wirkung solcher Filter. Die Größe des Filterfensters bestimmt die Art der erkennbaren Strukturen, so eignen sich Fenstergrößen über ca. 30 Pixel im Quadrat eher für die Trennung großflächiger Bereiche wie Landnutzung und Geologie, während Fenstergrößen von 3 bis 11 Pixeln im Quadrat sich eher für die Hervorhebung von Lineamenten eignen. Die großen Filterfenster haben dabei mit dem Problem der geringen Trennschärfe zu kämpfen, während kleine Fenster systematisch auch unerwünschte Information, wie zum Beispiel anthropogene Strukturen, sehr deutlich hervorheben.

Durchgeführt wurden Varianzfilteranalysen, angewendet auf die multispektralen Kanäle von Landsat-ETM 7+, die in die Lineamentinterpretation und die Verfeinerung der Trennung geologischer Einheiten einfließen. Genutzt wurde eine Filtergröße von 7 Pixeln im Quadrat. Zusätzlich wurde für den panchromatischen Kanal ein Satz Varianzfilteranalysen mit Fenstergrößen von 3 bis 9 Pixeln im Quadrat durchgeführt. Während die einzelnen Filter als Bildinhalt hauptsächlich den Schattenwurf zeigten, und somit indirekt das Entwässerungsnetz, konnte durch die Subtraktion einzelner Filterbilder ebenfalls zusätzlich geologische Information extrahiert werden.

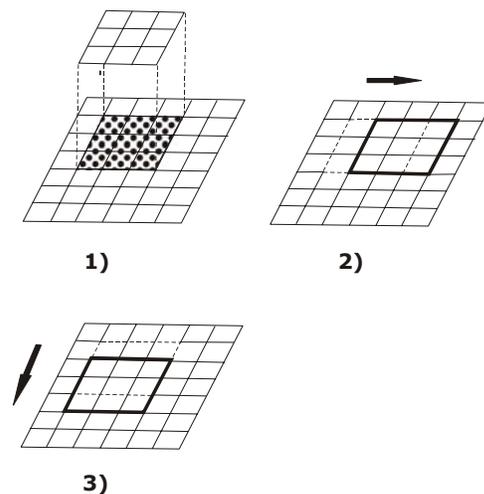


Abb. 3-8: Funktionsschema eines Konvolutionsfilters. In einer Matrix (hier 3 mal 3 Pixel groß) wird der Grauwert des Zentralpixels neu berechnet (1). Anschließend wird das Filterfenster um eine Position weiter gerückt und die Operation wiederholt (2). Sobald eine Zeile abgearbeitet ist, rückt das Fenster in die nächste Zeile (3). AUS LILLESAND & KIEFER (1999).

### 3.3.6 Kantenverstärkungsfilter

Bei der Extraktion von Lineamenten und geologischen Schichtgrenzen spielt die Kantenverstärkung eine wichtige Rolle. Es stehen dafür mehrere Bildverarbeitungsansätze zur Verfügung, wie Hochpaßfilter, Richtungsfilter und omnidirektionale Filter wie der Laplacefilter. Übersichten zu Filteroperationen geben LIST & BANKWITZ (1993), MATHER (1999), DRURY (1993) und andere. ICHOKU *et al.* (1996) beschreiben einen sogenannten "Bild-minus-Laplace-Filter" zur Hervorhebung von Entwässerungsstrukturen, während KRISHNAMURTY *et al.* (1992) und NALBANT & ALPTEKIN (1995) den Nutzen von Kantenverstärkungsfiltern für geologische Untersuchungen hervorheben.

Richtungsfilter wurden mit einer Fenstergröße von 5 und 7 Pixeln sowohl auf den panchromatischen Kanal mit 15 m Auflösung, als auch auf die ersten drei Hauptkomponenten der ETM-Kanäle im VIS, SWIR und NIR angewendet. Zur Interpretation wurden nur die Filterprodukte der ersten Hauptkomponente genutzt, da sie die deutlichsten Strukturen hervorhebt und den Großteil der Varianz und damit der Information der 6 ETM-Kanäle in sich trägt. Kantenverstärkungsfilter wurden in Form der "Bild-minus-Laplace-Filter" mit einer Filtergröße von 3 Pixeln im Quadrat angewendet. Dabei wird das Resultat des omnidirektionalen Laplacefilters vom ursprünglichen Bildinhalt subtrahiert. Resultat ist ein kantenverstärktes und geschärftes Bild, das die visuelle Interpretation erleichtert.

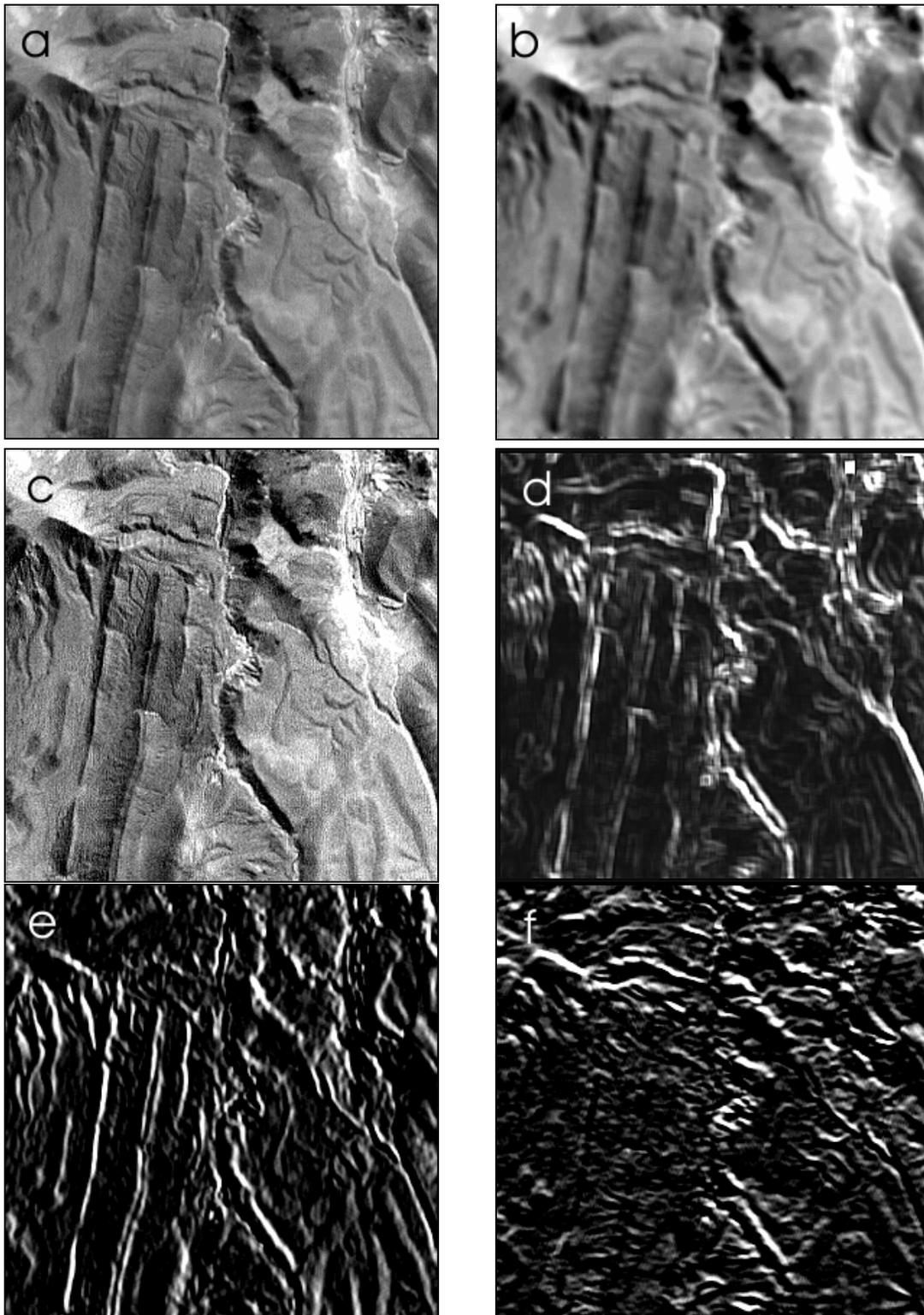


Abb. 3-9: Vergleich verschiedener Filteroperationen an einem beliebigen Satellitenbildausschnitt, hier angewendet auf einen Kanal. Bild a) zeigt die ursprünglichen Daten gestreckt, Bild b) einen 7 mal 7 Pixel großen Tiefpaßfilter, Bild c) einen 7 mal 7 großen Hochpaßfilter. Bild d) zeigt einen 7 mal 7 Pixel großen Varianzfilter, während Bilder e) und f) 5 mal 5 Pixel große Richtungsfiler zeigen, einmal in Nord-Süd-Richtung (e), einmal in Ost-West-Richtung (f). Lage des Ausschnittes siehe Verzeichnis.