

Optimierung der topographischen Normalisierung optischer Satellitendaten durch Einbeziehung von Kohärenzinformation

ANDRÉ TWELE & STEFAN ERASMI, Göttingen

Keywords: remote sensing, satellite data, pre-processing, topographic correction, rain-forest mapping

Zusammenfassung: Die Topographie der Landoberfläche beeinflusst neben der Aufnahmegeometrie und Atmosphärenbedingungen in entscheidendem Maße die durch Multispektral-Scanner gemessene Strahldichte im optischen Wellenlängenbereich. Aus diesem Grunde muss das Relief bei der Prozessierung von Satellitendaten optischer Sensoren in geeigneter Form berücksichtigt werden. Da der Grad der Reflexion einer Oberfläche neben Objekt- und Reliefeigenschaften auch von der Anisotropie der Landoberfläche abhängt, sollten bei der Reliefkorrektur zusätzlich Objektklassen bzw. strukturelle Oberflächeneigenschaften berücksichtigt werden. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der statistischen Bewertung verschiedener (lambertscher und nicht-lambertscher) Verfahren der Reliefkorrektur. Die Modifikation der vorhandenen Verfahren erfolgte durch die Einbeziehung von aus SAR-Satellitendaten abgeleiteten Kohärenzmesungen. Die Ergebnisse zeigen, dass eine stratifizierte Reliefkorrektur auf Basis von Kohärenzdaten den Einfluss der Topographie auf die Reflexion solarer Einstrahlung erheblich verringert. Hierdurch wird eine verbesserte Klassenhomogenität und spektrale Trennbarkeit von Landschaftseinheiten erreicht.

Summary: *Optimizing topographic correction algorithms for optical satellite data using coherence information.* Apart from viewing geometry and atmospheric conditions, the topography of the land surface substantially affects reflectance measurements from multispectral scanners in the optical domain. For this reason, topographically induced illumination effects must be accounted for using suitable preprocessing methods. Besides object properties and topographic attributes, reflectance characteristics are also influenced by the degree of surface anisotropy. Therefore, the terrain normalization methodology should ideally be tailored to the variability of structural surface properties within the area under investigation. This study evaluated different algorithms (both lambertian and non-lambertian) for topographic normalization of optical satellite imagery using statistical analysis. A modification of existing methods was carried out by the inclusion of coherence information derived from spaceborne interferometric SAR-data. The results show that stratified terrain correction based on coherence classes strongly reduces the topographic impact and leads to an improved class homogeneity and spectral separability of landscape units, potentially minimizing misclassification due to spectral overlap.

1 Einleitung

Die Qualität von Produkten, die aus multispektralen Satellitendaten abgeleitet werden, ist maßgeblich von der Güte der Datenvorprozessierung abhängig. Diese sollte neben Sensorkalibrierung und Atmosphärenkorrektur immer auch den Einfluss des Reliefs auf die Reflexion von Landoberflächen

berücksichtigen. Die Vernachlässigung des Reliefeinflusses kann zu erheblichen Fehlinterpretationen sowohl bei der Ableitung qualitativer Merkmale (Landoberflächentypen) als auch bei der Schätzung biophysikalischer Oberflächenparameter aus Reflexionswerten führen. Die Auswirkung der Signalverfälschung ist im Allgemeinen abhängig von dem lokalen Einfallswinkel und

der Wellenlänge der solaren Einstrahlung, sowie von den Reflexionscharakteristika der Landoberfläche. Zur Korrektur der reliefbedingten radiometrischen Verzerrung existiert eine Reihe von Korrekturverfahren, die sich generell in zwei Gruppen unterteilen lassen. Die physikalisch basierten Ansätze beruhen in den meisten Fällen auf der Inversion von Strahlungs- bzw. Reflexionsmodellen. Da diese Modelle auf eine möglichst exakte Beschreibung von Oberflächenparametern auf Bestandesebene angewiesen sind ist ihre Anwendbarkeit in den meisten Fällen nur eingeschränkt möglich bzw. sehr zeitaufwendig. Die andere Gruppe der Korrekturverfahren basiert auf dem lokalen solaren Einfallswinkel, wobei je nach Modell zusätzlich wellenlängen- und/oder landoberflächenabhängige Korrekturfaktoren einbezogen werden. Eine Reihe von Studien haben gezeigt, dass bereits mit diesen, im Vergleich zu den physikalischen Modellen, relativ einfachen Methoden eine grundlegende Verbesserung der Satellitenbildinterpretation, vor allem in gebirgigem Gelände, erzielt werden kann (MEYER et al. 1993, HEROLD et al. 2000, RIAÑO et al. 2003). Die Genauigkeit von Korrekturverfahren auf Basis des lokalen Einfallswinkels ist trotz der Beschränkung auf nur wenige Variablen in der Regel durch zwei Umstände eingeschränkt:

- die Verfügbarkeit und Lagegenauigkeit eines digitalen Geländemodells und
- die Problematik der Vorstratifizierung der Landoberfläche.

Vor allem für entlegene und schwer zugängliche Regionen, wie z. B. die Regenwälder der immerfeuchten Tropen, sind Geländemodelle selten in ausreichend genauer Auflösung verfügbar. Hier bieten jedoch die Daten der Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) seit kurzem eine viel versprechende Alternative. Der zweite Aspekt beruht auf der Problematik, dass der Oberflächentyp einen signifikanten Einfluss auf den wellenlängenabhängigen und empirisch ermittelten Korrekturfaktor hat. Da aber eine Landoberflächenklassifizierung immer erst auf Basis von vorprozessierten Daten statt-

finden kann, für die Prozessierung wiederum aber Informationen über die Landoberfläche benötigt werden, müssen geeignete Lösungsansätze für dieses Problem entwickelt werden. Solche Ansätze können bildbasierte Indikatoren (z. B. Vegetationsindizes) zur Landschaftskategorisierung verwenden oder geeignete Parameter aus zusätzlichen Datenquellen ableiten.

Der vorliegende Beitrag fasst zunächst die vorhandenen Methoden zur Korrektur topographisch induzierter radiometrischer Verzerrungen in optischen Satellitendaten zusammen. Anschließend werden Modifikationen der vorhanden Methoden vorgestellt sowie Lösungsansätze skizziert und diskutiert, die über eine vorab durchgeführte Landschaftskategorisierung (Stratifizierung) das Resultat einer topographischen Normalisierung verbessern können. Ziel der Untersuchungen ist die Erstellung eines einfachen und stabilen Verfahrens zur Reduktion des Reliefeinflusses auf die Reflexion von Landoberflächen in der optischen Satellitenfernerkundung.

2 Untersuchungsgebiet und verwendete Daten

Das Untersuchungsgebiet liegt in Sulawesi, Indonesien. Es wird begrenzt durch die Verwaltungsgrenzen von fünf Bezirken innerhalb der Provinz Zentral-Sulawesi (Sulawesi Tengah). Die Gesamtfläche des Gebietes beträgt ca. 7.500 km², wovon ca. 2.200 km² auf den Lore Lindu Nationalpark entfallen, dessen Randbereich den Übergangsbereich von Naturwald zu mehr oder weniger intensiven Landnutzungsformen bildet. Die Landnutzung im Randbereich des tropischen Regenwaldes in Zentral-Sulawesi ist geprägt durch eine Reihe verschiedener, räumlich und zeitlich heterogener Agroforst- und Landwirtschaftsformen, die einen Gradienten der Landnutzungsintensität und Artenvielfalt abbilden. Die Topographie im Untersuchungsgebiet ist durch stark reliefiertes Gelände mit Höhen zwischen 0 und 2600 m ü. NN gekennzeichnet.

Die Datenbasis für die Untersuchungen zur topographischen Normalisierung be-

steht aus einer Landsat ETM+-Aufnahme (Path/Row 114/61) vom 28.09.2002 für die Projektregion in Zentral-Sulawesi sowie aus Tandem-Aufnahmen der europäischen Radarsatelliten ERS-1 und ERS-2 (Frame 3627/3645). Die digitalen Höhendaten wurden aus topographischen Karten (1:50.000) erfasst. Sämtliche Datensätze wurden geometrisch auf UTM Zone 51 S (WGS84) angepasst. Die Landsat-Szene wurde hierbei mittels eines Sensormodells auf Basis des digitalen Höhenmodells und 65 Passpunkten orthorektifiziert. Weitere Vorprozessierungsschritte umfassten die Sensorkalibrierung, sowie eine Atmosphärenkorrektur nach CHAVEZ (1996).

3 Methoden der Topographischen Normalisierung

Grundsätzlich lassen sich die Methoden in zwei Gruppen unterteilen. Die sog. Cosinus-Modelle betrachten die Oberfläche als eine isotrope Fläche, von der die einfallende Strahlung in alle Richtungen gleichmäßig gestreut wird (lambertsches Modell). Eine Weiterentwicklung der lambertschen Methoden stellen die nicht-lambertschen Verfahren dar. Diese Gruppe von Verfahren versucht durch Verwendung von zumeist empirisch abgeleiteten Korrekturfaktoren die bidirektionale Komponente bei der Entstehung von Reflexionsmustern anzunähern. Die empirischen Faktoren werden in der Regel von der Wellenlänge, der Aufnahmegeometrie und der Oberflächenbeschaffenheit beeinflusst (MEYER et al. 1993, TOKOLA et al. 2001). Für die Verwendung jedes der beschriebenen Korrekturverfahren ist zunächst die Errechnung des lokalen solaren Einfallswinkels i notwendig. Dieser ergibt sich aus dem Winkel zwischen direkter solarer Einstrahlung und der Flächennormalen eines Geländeausschnitts und kann aus dem solaren Zenitwinkel und einem vorliegenden digitalen Geländemodell für jedes Bildelement berechnet werden (Gl. 1):

$$\cos(i) = \cos\Theta_n \times \cos\Theta_{sz} + \sin\Theta_{sz} \times \sin\Theta_n \times \cos(\Phi_s - \Phi_n)$$

Hierbei beschreibt Θ_{sz} den Zenitwinkel und Φ_s den Azimut der direkt einfallenden Sonnenstrahlen, Θ_n die Neigung und Φ_n die Exposition des Geländeausschnitts.

Das einfachste Verfahren zur topographischen Korrektur ist die Cosinus-Methode (TEILLET et al. 1982), die lediglich den Zenitwinkel der Sonne und den errechneten lokalen Einfallswinkel i berücksichtigt:

$$L_n = L \times \frac{\cos(\Theta_{sz})}{\cos(i)} \quad (Gl. 2)$$

L gibt hierbei den Reflexionsgrad einer geneigten Oberfläche an, L_n beschreibt den korrigierten Reflexionswert. Die Cosinus-Korrektur überinterpretiert in der Regel den Einfluss des Reliefs auf die gerichtete Reflexion (MEYER et al. 1993, HEROLD et al. 2000), was auf das zugrunde liegende Modell der isotropen Oberfläche mit gleichförmiger, richtungsunabhängiger Reflexion zurück zu führen ist. Die Überkorrektur macht sich insbesondere in sehr steilen, sonnenabgewandten Geländeabschnitten bemerkbar.

Eine Erweiterung der Cosinus-Korrektur stellt das Minnaert-Modell dar. MINNAERT (1941) führte als Faktor für den Grad der Richtungsverteilung der Reflexion eine wellenlängenabhängige Konstante k ein, die durch die Steigung der folgenden Gleichung beschrieben werden kann (Gl. 3):

$$\log(L \times \cos\Theta_n) = \log L_n + k \times \log(\cos(i) \times \cos(\Theta_n))$$

Das Cosinus-Modell wird durch die Minnaert-Konstante wie folgt erweitert:

$$L_n = L \times \left(\frac{\cos(\Theta_{sz})}{\cos(i)} \right)^k \quad (Gl. 4)$$

Eine Modifikation der Minnaert-Korrektur erfolgt bei COLBY (1991) durch die Einbeziehung des Neigungswinkels Θ_n , welcher bei Nadir-blickenden Sensoren dem lokalen Aufnahmewinkel entspricht:

$$L_n = L \times \cos(\Theta_n) \times \left(\frac{\cos(\Theta_{sz})}{\cos(i) \times \cos(\Theta_n)} \right)^k \quad (Gl. 5)$$

Ähnlich dem Minnaert-Modell erfolgt auch bei der C-Korrektur (TEILLET et al. 1982) eine Gegenkorrektur zur Übergewichtung des Topographieinflusses beim Cosinus-Verfahren durch die Implementierung einer semi-empirischen Konstante.

$$L_n = L \times \left(\frac{\cos(\Theta_{sz}) + c}{\cos(i) + c} \right) \quad (Gl. 6)$$

Die Konstante c ergibt sich als Quotient aus den Variablen Schnittpunkt und Steigung der linearen Regression des spektralen Reflexionsgrades aus $\cos(i)$:

$$L = m \times \cos(i) + b \quad \text{mit} \quad c = \frac{b}{m} \quad (Gl. 7)$$

Auf der gleichen Annahme dieses linearen Zusammenhangs basiert das empirisch-statistische Korrektur-Modell (MEYER et al. 1993):

$$L_n = L - \cos(i) \times m - b + \bar{L} \quad (Gl. 8)$$

Der Parameter beschreibt die landoberflächenspezifische mittlere Reflexion für jeden untersuchten Spektralbereich.

Die Bewertung der Korrektur-Modelle erfolgt nach visueller Interpretation der korrigierten Bildausschnitte durch die Berechnung statistischer Parameter, welche geeignet sind, das Ausmaß der Bildverbesserung quantitativ darzustellen. Diese gehen im Wesentlichen aus der Regressionsgleichung von Reflexionsgrad und $\cos(i)$ hervor (Steigung m , Bestimmtheitsmaß R^2) und werden durch die Betrachtung der klassenspezifischen Bildstatistik (Mittelwert, Variationskoeffizient) der korrigierten Reflexionswerte vervollständigt. Ein ideales Korrekturmodell sollte für die Parameter m und R^2 Werte nahe Null aufweisen. Daneben sollte die Klassenhomogenität durch die Korrektur verbessert werden.

Die Berechnung der semi-empirischen Konstanten für die nicht-lambertschen Verfahren erfolgte zunächst wellenlängenspezifisch für den in der Untersuchungsregion vorherrschenden Landoberflächentyp „tropischer Regenwald“. Die Modellbildung erfolgte jeweils auf Basis einer Stichprobe von

ca. 5000 Bildpunkten. Zur Validierung der verschiedenen Korrekturansätze wurden mittels Stichprobe 6850 Bildpunkte im Zufallsverfahren (random sampling) ermittelt. Des Weiteren wurden die Korrekturfaktoren für die nicht-lambertschen Modelle neben einer wellenlängenspezifischen auch einer landoberflächenspezifischen Differenzierung unterzogen. Als alternative Stratifizierungsbasis wurde in dieser Arbeit anstatt Vegetationsindices die aus ERS-Tandemdaten abgeleitete interferometrische Kohärenz zu Grunde gelegt. Von dieser wird ein generell größerer Zusammenhang zu strukturorientierten, die Minnaert-Konstante beeinflussenden, Landschaftsparametern erwartet (TWELE & ERASMI 2005). Zur Beantwortung der Frage, in welchem Maße eine stratifizierte Korrekturmethode zu einer verbesserten Normalisierung aller Oberflächentypen beiträgt, wurde eine synthetische Schwellenwertbildung der gefilterten Kohärenz in drei Landoberflächenkategorien vorgenommen und die hieraus gewonnenen Korrekturergebnisse nach o.g. Verfahren statistisch analysiert.

4 Ergebnisse

4.1 Korrektur ohne Stratifizierung

Bereits der visuelle und statistische Vergleich unkorrigierter Bilddaten mit einem aus dem digitalen Höhenmodell abgeleiteten Beleuchtungsmodell verdeutlicht den starken Einfluss der Topographie auf die Reflexion im optischen Wellenlängenbereich (Abb. 1). Dieser wird durch die Betrachtung der Bestimmtheitsmaße für die lineare Regression der Reflexion aus $\cos(i)$ belegt. Die wellenlängenabhängigen Werte für R^2 weisen bei nicht-korrigierten Daten mit einem Bestimmtheitsmaß von bis zu 0.5233 (Landsat ETM+ Kanal 4) auf einen starken Einfluss reliefbedingter Beleuchtungsverhältnisse auf die Reflexion hin (Tab. 1).

Das Cosinus-Verfahren erwies sich als unzureichend, den Topographieinfluss zu kompensieren und führte in der Gesamtbeurteilung der statistischen Parameter sogar zu einer Verschlechterung des unkorrigier-

Tab. 1: Regressionsparameter aus $L_n = m \times \cos(i) + b$ und Variationskoeffizient der Klasse „tropischer Regenwald“; exemplarisch für die Kanäle 3, 4 und 7.

Landsat ETM+ Band	Korrekturmethode	Steigung (m)	Mittelwert (μ)	R^2	Variationskoeffizient (%)
Band 3	Unkorrigiert	0.0116	0.0218	0.390	13.89
	Cosinus (Gl. 2)	-0.0213	0.0241	0.570	19.02
	Minnaert (Gl. 4)	0.0004	0.0225	0.001	11.08
	Minnaert (modif.) (Gl. 5)	0.0026	0.212	0.033	10.83
	C-Factor (Gl. 6)	0.0027	0.0223	0.031	11.12
	Statistical-Empirical (Gl. 8)	0.0021	0.0219	0.021	10.92
Band 4	Unkorrigiert	0.1506	0.2719	0.523	12.46
	Cosinus (Gl. 2)	-0.2613	0.3006	0.643	17.65
	Minnaert (Gl. 4)	-0.047	0.2849	0.080	9.48
	Minnaert (modif.) (Gl. 5)	-0.0221	0.2716	0.025	8.40
	C-Factor (Gl. 6)	-0.0332	0.2832	0.045	9.04
	Statistical-Empirical (Gl. 8)	-0.0286	0.2668	0.038	8.94
Band 7	Unkorrigiert	0.0273	0.0589	0.449	11.25
	Cosinus (Gl. 2)	-0.0632	0.0654	0.705	18.75
	Minnaert (Gl. 4)	-0.0076	0.0613	0.051	8.86
	Minnaert (modif.) (Gl. 5)	-0.0015	0.0579	0.003	8.25
	C-Factor (Gl. 6)	-0.002	0.0607	0.004	8.45
	Statistical-Empirical (Gl. 8)	-0.0018	0.0614	0.004	8.45

ten Bildes (Tab. 1). Dies schlägt sich insbesondere in sonnenabgewandten, stark geneigten Gebieten nieder, wo es zu einer deutlichen Überkorrektur des Reflexionssignals kommt (negative Werte für m).

Alle behandelten nicht-lambertschen Verfahren zeigen hingegen eine deutliche Verbesserung des Gesamtbildes, was sich in einer signifikanten Verminderung der Werte für m und R^2 zeigt. Die Varianzanalyse weist ebenfalls auf deutliche Verbesserungen gegenüber den nicht-korrigierten Bilddaten hin, d. h. der Mittelwert der Verteilung der Reflexionswerte für die Klasse „tropischer Regenwald“ wurde bei gleichzeitig niedriger Variabilität innerhalb der Waldgebiete weitestgehend erhalten. Diese Aussagen treffen sowohl für beide Varianten der Minnaert-Korrektur als auch für die C-Korrektur und die empirisch-statistische Modellierung zu. Obwohl die Unterschiede zwischen den nicht-lambertschen Modellen recht gering sind, wurden die insgesamt besten Ergebnisse mit der modifizierten Minnaert-Methode (v. a. im NIR/MIR-Spektralbereich) erzielt.

4.2 Korrektur mit Stratifizierung

Durch lineare Regression wurden aus den nach Kohärenzniveau stratifizierten Landoberflächenkategorien separate Koeffizientensätze (k) ermittelt. Diese lassen erkennen, dass mit steigender Kohärenz (bzw. geringerer Vegetationsdichte) auch die empirisch er-

Tab. 2: Minnaert-Konstanten k (Vorstratifizierung nach interferometrischer Kohärenz c).

Band	TM3	TM4	TM5	TM7
0 < c < 0.285 (hohe Vegetationsdichte)				
Minnaert Konstante k	0.3851	0.4795	0.5094	0.4417
0.285 ≤ c < 0.5 (mittlere Vegetationsdichte)				
Minnaert Konstante k	0.2234	0.4011	0.4115	0.3634
0.5 ≤ c < 1 (niedrige Vegetationsdichte bzw. unbewachsen)				
Minnaert Konstante k	0.2084	0.3522	0.3437	0.2884

Tab. 3: Regressionsparameter aus $L_n = m \times \cos(i) + b$ und Variationskoeffizient der nach Kohärenz c stratifizierten Datensätze; exemplarisch für die Kanäle 3, 4 und 7.

Landsat ETM+ Band	Korrekturmethode	Steigung (m)	Mittelwert (μ)	R^2	Variationskoeffizient (%)
$0 < c < 0.285$ (hohe Vegetationsdichte)					
Band 3	Unkorrigiert	0.0098	0.028	0.208	14.29
	Minnaert (mod.) (Gl. 5)	-0.0015	0.028	0.005	10.71
	Strat. Minnaert (mod.) (Gl. 5)	-0.0013	0.028	0.004	10.71
Band 4	Unkorrigiert	0.1634	0.301	0.586	11.96
	Minnaert (mod.) (Gl. 5)	-0.0216	0.318	0.024	7.55
	Strat. Minnaert (mod.) (Gl. 5)	0.0035	0.313	0.001	7.35
Band 7	Unkorrigiert	0.0297	0.064	0.403	12.50
	Minnaert (mod.) (Gl. 5)	-0.0002	0.066	0.000	9.09
	Strat. Minnaert (mod.) (Gl. 5)	-0.0008	0.066	0.001	9.09
$0.285 \leq c \leq 0.5$ (mittlere Vegetationsdichte)					
Band 3	Unkorrigiert	0.0045	0.044	0.012	13.64
	Minnaert (mod.) (Gl. 5)	-0.0145	0.046	0.099	15.22
	Strat. Minnaert (mod.) (Gl. 5)	-0.002	0.043	0.002	13.95
Band 4	Unkorrigiert	0.1367	0.306	0.238	14.05
	Minnaert (mod.) (Gl. 5)	-0.0703	0.337	0.064	12.76
	Strat. Minnaert (mod.) (Gl. 5)	0.0023	0.321	0.000	12.15
Band 7	Unkorrigiert	0.0247	0.074	0.077	18.92
	Minnaert (mod.) (Gl. 5)	-0.0121	0.079	0.017	17.72
	Strat. Minnaert (mod.) (Gl. 5)	-0.0031	0.077	0.001	17.18
$0.5 \leq c < 1$ (niedrige Vegetationsdichte bzw. unbewachsen)					
Band 3	Unkorrigiert	0.0112	0.086	0.001	37.21
	Minnaert (mod.) (Gl. 5)	-0.0189	0.089	0.003	38.20
	Strat. Minnaert (mod.) (Gl. 5)	0.0035	0.085	0.000	36.47
Band 4	Unkorrigiert	0.1261	0.249	0.067	19.28
	Minnaert (mod.) (Gl. 5)	-0.0482	0.271	0.008	19.19
	Strat. Minnaert (mod.) (Gl. 5)	0.0363	0.258	0.006	18.60
Band 7	Unkorrigiert	0.0488	0.150	0.006	45.33
	Minnaert (mod.) (Gl. 5)	-0.0307	0.157	0.003	44.59
	Strat. Minnaert (mod.) (Gl. 5)	0.0203	0.152	0.001	44.08

mittelten Minnaert-Konstanten sinken (Tab. 2). In einem folgenden Schritt wurden die nach Kohärenzniveau getrennten Bildbereiche mit den jeweils spezifisch für sie berechneten Minnaert-Konstanten topographisch normalisiert.

Die statistische Auswertung des aus der stratifizierten Korrektur berechneten Datensatzes zeigt eine weitere Verringerung des Topographieinflusses bei gleichzeitiger

Reduzierung des Variationskoeffizienten (Tab. 3). Da die Minnaert-Konstanten des nicht-stratifizierten Datensatzes überwiegend aus bewaldetem Gebiet mit niedriger Kohärenz ermittelt wurden, fallen die Unterschiede zwischen stratifizierter und nicht-stratifizierter Korrektur bei diesem Oberflächentyp relativ gering aus. Bei den nach mittlerer und hoher Kohärenz stratifizierten Oberflächenklassen zeigen sich hingegen

deutliche Vorteile von angepassten Minnaert-Konstanten, welches sich in einer weiteren Reduzierung der Werte für R^2 und m niederschlägt. Gleichzeitig fällt auf, dass die Mittelwerte μ der Klassenstatistik näher am unkorrigierten Datensatz liegen und so einer geringeren korrekturbedingten radiometrischen Verzerrung unterworfen sind.

5 Diskussion und Zusammenfassung

Die starke Verbesserung der mit nicht-lambertschen Korrekturverfahren erreichten Ergebnisse lässt sich in der vorliegenden Studie vor allem auf die Reflexionscharakteristika von tropischem Regenwald zurückführen, welche stark von einer diffusen, lambertschen Annahme abweichen. Diese Hypothese wird durch die ermittelten Minnaert-Konstanten unterstützt, welche auf

die relativ gerichteten Reflexionskomponenten natürlicher Oberflächen schließen lassen. Die Annahme eines lambertschen Streumodells führt deshalb folgerichtig zu einer starken Überkorrektur des Reliefeinflusses.

Bei der Anwendung nicht-lambertscher Korrekturverfahren bleibt in vielen Arbeiten unberücksichtigt, dass der Grad gerichteter bzw. vom lambertschen Modell abweichender Reflexion oberflächenspezifisch unterschiedlich ist. Nur wenige Arbeiten (HEROLD et al. 2000, TOKOLA et al. 2001) haben zur empirischen Berechnung der Korrekturkonstanten eine Trennung einzelner Oberflächenklassen vorgenommen. Hierbei wurde durch Schwellenwertbildung eines Vegetationsindex zumeist eine binäre Einteilung in die Klassen „Vegetation“ und „nicht-Vegetation“ vorgenommen.

Die Untersuchung nicht-lambertscher Verfahren hat in der vorliegenden Arbeit ge-

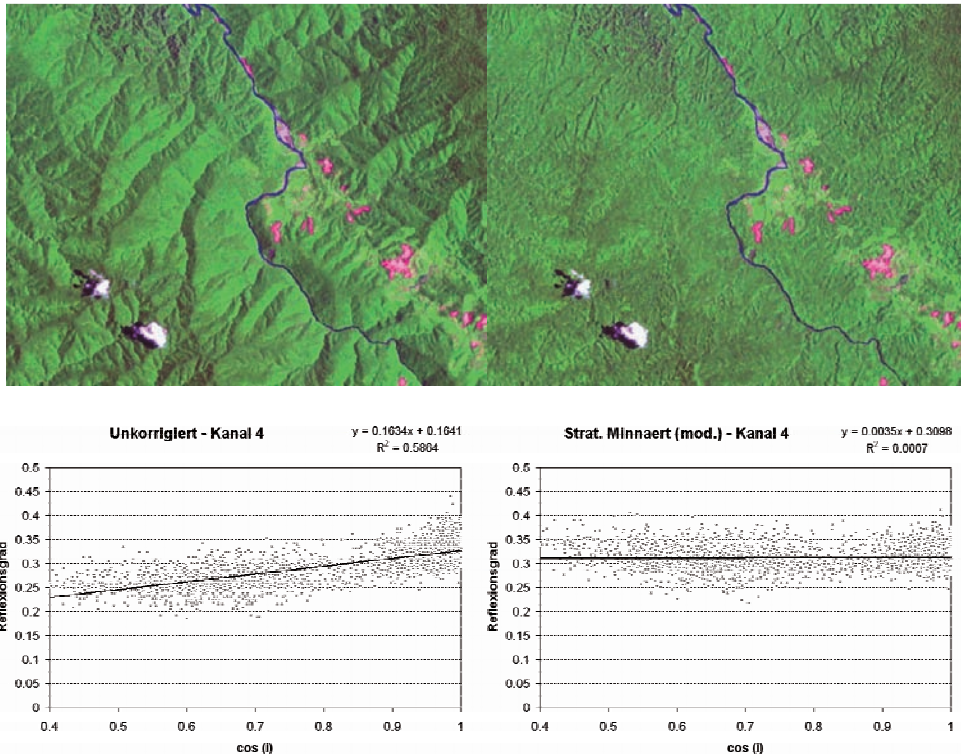


Abb. 1: Visueller (oben) und statistischer Vergleich (unten) eines unkorrigierten Bildausschnitts (links) im Vergleich zum Korrekturergebnis mit stratifizierter, modifizierter Minnaert-Methode (rechts) (RGB 7/4/3).

zeigt, dass es zur Minimierung von Fehlerkorrekturen erforderlich ist, oberflächenspezifische Korrektur-Konstanten (hier: Minnaert-Konstanten) zu ermitteln. Da die Klassifikation der Landnutzung bzw. Landoberfläche jedoch erst in einem der Korrektur nachfolgenden Arbeitsschritt durchgeführt werden kann, muss eine Stratifizierung aus kontinuierlichen, aus Satellitendaten abgeleiteten, Oberflächenindikatoren durchgeführt werden. Die in dieser Arbeit verwendete Stratifizierung mittels Schwellenwertbildung interferometrischer Kohärenz (ERS-Tandem) stellte sich als geeignetes Mittel heraus, die Daten in drei Strukturklassen mit jeweils spezifisch aus ihnen berechneten Minnaert-Konstanten zu gruppieren. Dieser Stratifizierung liegt die Annahme zugrunde, dass der eindeutige Trend, welcher sich bei der Berechnung der Korrekturkonstanten aus verschiedenen Kohärenzklassen ergibt, durch den starken Zusammenhang der Kohärenz zu strukturorientierten Oberflächenparametern (Vegetationsdichte und -höhe) bedingt ist.

Generell sind jedoch auch andere Verfahren für die Stratifizierung denkbar, wie z. B. die Berechnung von Vegetationsindizes oder die Bildsegmentierung mit anschließender Bildung objektbezogener Korrekturfaktoren.

Durch Ableitung einer entsprechenden Regressionsgleichung ist des Weiteren die Herleitung von kontinuierlichen Minnaert-Konstanten aus Kohärenzdaten denkbar. Dies würde gleichzeitig die Problematik einer synthetischen Schwellenwertbildung lösen.

Danksagung

Diese Arbeit wurde durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des SFB-552 (Stability of Rainforest Margins in Indonesia) gefördert.

Literatur

- CHAVEZ, P.S., 1996: Image-based atmospheric corrections. Revisited and improved. – *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **62** (9): 1025–1036.
- COLBY, J. D., 1991: Topographic normalization in rugged terrain. – *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **57**: 531–537.
- HEROLD, M., MÜSCHEN, B., MÜLLER, A., KLENKE & M., STEINNOCHER, K., 2000: Zur radiometrischen Reliefkorrektur von Fernerkundungsdaten. – *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation*, **2000** (5): 347–354.
- MEYER, P., ITTEN, K. I., KELLENBERGER, J., SANDMEIER, S. & SANDMEIER, R., 1993: Radiometric correction of topographically induced effects on Landsat TM data in an alpine environment. – *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **48**: 17–28.
- MINNAERT, M., 1941: The reciprocity principle in lunar photometry. – *Astrophysical Journal* **93**: 403–410.
- RIANO, D., CHUVIECO, E., SALAS, F. J. & AGUADO, I., 2003: Assessment of Different Topographic Corrections in Landsat-TM Data for Mapping Vegetation Types. – *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **41**: 1056–1061.
- TEILLET, P. M., GUINDON, B. & GOODENOUGH, D. G., 1982: On the Slope-Aspect Correction of Multispectral Scanner Data. – *Canadian Journal of Remote Sensing* **8** (2): 84–106.
- TOKOLA, T., SARKEALA, J., & VAN DER LINDEN, M., 2001: Use of topographic correction in Landsat TM-based forest interpretation in Nepal. – *International Journal of Remote Sensing* **22** (4): 551–563.
- TWELE, A. & ERASMI, S., 2005: Evaluating topographic correction algorithms for improved land cover discrimination in mountainous areas of Central Sulawesi. – In: ERASMI, S., CYFFKA, B. & KAPPAS, M. (Hrsg.): *Remote Sensing & GIS for Environmental Studies: Applications in Geography*. – Göttinger Geographische Abhandlungen **113**: 289–297.

Anschrift der Autoren:

Dipl.-Geogr. ANDRÉ TWELE
 Dr. STEFAN ERASMI
 Georg-August Universität Göttingen
 Geographisches Institut,
 Abteilung Kartographie, GIS & Fernerkundung
 Goldschmidtstraße 5, D-37077 Göttingen
 Tel.: 0551-398015
 e-mail: atwele@uni-goettingen.de
 serasmi@uni-goettingen.de

Manuskript eingereicht: Januar 2005
 Angenommen: März 2005