

Das automatische Atmosphärenkorrekturverfahren „DurchBlick“^{*}

Thomas HOLZER-POPP, Michael BITTNER, Erik BORG, Stefan DECH,
Thilo ERBERTSEDER, Bernd FICHTELMANN, Marion SCHROEDTER

1 Einleitung

1.1 Operationalisierung der Fernerkundung

Die Intensität und das Ausmaß, mit der die Menschheit die Umwelt verändert hat, führte in letzter Zeit zu immer größerer Besorgnis um die Auswirkungen auf das empfindliche Klimasystem der Erde und die Nachhaltigkeit der menschlichen Einflussnahme. Die Entwicklung und der Betrieb von satellitengestützten Sensoren und Fernerkundungsmethoden bieten herausragende Möglichkeiten, viele in diesem Zusammenhang stehende Prozesse auf der Erdoberfläche zu beobachten. Aus diesem Grund empfängt, verarbeitet, veredelt und archiviert das Deutsche Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) eine Vielzahl unterschiedlicher Erdbeobachtungsdaten von Satelliten wie NOAA, Landsat, ERS, Terra/Aqua und zukünftig ENVISAT. Die Qualität der Analyse der Erdoberfläche sowie ihrer Prozesse mit Satellitendaten wird jedoch durch Kenntnis um den Zustand der Atmosphäre zum jeweiligen Aufnahmezeitpunkt bestimmt.

Absorptions- und Streuprozesse in der Atmosphäre beeinträchtigen den Transport der Solarstrahlung entlang ihres Weges von der Sonne zur Erdoberfläche und von der Erdoberfläche zum Sensor. Das am Sensor gemessene Signal wird hierdurch je nach Wellenlänge und Zusammensetzung der Atmosphäre verändert. Um genaue Informationen über die Erdoberfläche zu erhalten und optische Fernerkundungsdaten räumlich und zeitlich vergleichbar zu machen, muss der Einfluss der Atmosphäre korrigiert werden.

Hierzu muss der Zustand der Atmosphäre für jedes vom Sensor aufgenommene Bildelement (Pixel) bekannt sein. Nur so ist es möglich, den Weg der Strahlung ("Strahlungstransport") mit mathematischen Modellen nachzuvollziehen und die spektralen Eigenschaften der Erdoberfläche ohne Störung zu rekonstruieren. Dies bringt zwei große Probleme mit sich: (1) Strahlungstransportmodelle sind rechenzeitaufwendig, was die Anwendung auf große Datenmengen immer noch erschwert. (2) Die Atmosphäre ist ein hochdynamisches, komplexes System, dessen auf kleinsten Skalen variieren.

Eine der Hauptforderungen zur operationellen Nutzung von Fernerkundungsdaten besteht deshalb darin, große Datenmengen in immer gleicher Qualität ohne menschliche Interaktion zu verarbeiten.. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, die verschiedenen

^{*} Fernerkundung und GIS: Neue Sensoren – innovative Methoden, H. Wichmann Verlag, Heidelberg, 2001 / patentrechtlich geschützt: *United States Patent No. US 6,484,099 B1 Nov. 19, 2002*

Verarbeitungsstufen durch automatische Verarbeitungsketten zu realisieren. Eine Atmosphärenkorrektur ist dabei wesentliche Voraussetzung, um aus Fernerkundungsdaten quantitative geo- und biowissenschaftliche Parameter und Indikatoren abzuleiten, um diese dann regelmäßig in Prozess- und Umweltmodelle einzubeziehen.

Gegenwärtig gibt es eine Reihe wissenschaftlicher (z.B. SMAC, RAHMAN/DEDIEU, 1994; EXACT, POPP, 1993 und 1995; 6S, VERMOTE et al. 1997) und/oder interaktiver (z.B. ATCOR, RICHTER, 1996 und 1997) Korrekturverfahren, die aber geschultes Personal und manuelle Optimierungsschritte voraussetzen. Trotz der hohen Qualität dieser Verfahren führt die Wiederholung der Verarbeitungsschritte auf verschiedene, zeitlich entfernte Datensätze in der Regel zu subjektiv bedingten Abweichungen. „DurchBlick“ zielt hingegen erstmals auf die *vollautomatische* Korrektur großer Datenmengen durch die Einbeziehung aktueller Zusatzdaten zum Aufnahmezeitpunkt (z.B. Wasserdampf, Ozon, Höhenmodell, Aerosolmenge und -typ, Wolken/Schatten, Bodentyp), um so operationell und standardisiert große Datenmengen verarbeiten zu können.

1.2 Atmosphärische Einflüsse auf die Messung der Bodenalbedo

Vergleicht man das ungestörte Sonnenspektrum am Oberrand der Atmosphäre mit dem Spektrum nach Durchdringung der Erdatmosphäre wird deutlich, dass das Spektrum in seiner spektralen und Zusammensetzung beim Durchgang durch die Atmosphäre modifiziert wurde. Die wichtigsten Absorptionsbanden der Erdatmosphäre im solaren Spektrum werden dabei durch Wasserdampf, Ozon, Sauerstoff, Kohlendioxid und Methan verursacht. Außerdem bewirken Aerosole (feste und flüssige Partikel in der Atmosphäre) und Moleküle eine breitbandige Abschwächung der solaren Einstrahlung.

Tab. 1: Maximale Fehler der korrigierten Albedo in Abhängigkeit von Variationen des Atmosphärenzustandes. Wesentliche Fehler sind grau unterlegt; ein „X“ zeigt große Sensitivität, für die aber kein Zahlenwert berechnet wurde.

Parameter (Wertebereich, Einheit)	Ozon-gehalt (250-500 D. U.)	Wasser-dampf (0.5-4.0 g cm ⁻²)	Meeres-höhe (0-2000m)	Aerosol-menge (0.05-0.8 bei 550nm)	Aerosol-tyt (-)	Boden-tyt (-)	Sonnen-Zenit (0-70°)
Blauer Kanal (TM1)			+ X	+ X	0.14	0.04	<0.01
Roter Kanal (TM3, AVHRR1)	- 13.5%	- 4.4%	+	+ 0.12	X		
Nahinfrarot Kanal (TM4, AVHRR2)	- 0.5%	+ 22%	+	+	0.02	0.12	0.10
Mittler Infrarot Kanal (TM5, TM7)		X			0.04	0.30	0.10
Vegetationsindex NDVI=0.05	+ 0.07	- 0.12	- 0.09	- 0.08	X		
Vegetationsindex NDVI=0.85	+	- 0.038	- 0.26	- 0.34		X	
Geforderte Genauigkeit (für Ergebnisfehler<0.01)	50 D. U.	1 gcm ⁻²	250 m	0.1	Best-möglich	Best-möglich	1°

Die atmosphärischen Prozesse der Absorption und Streuung führen zur komplexen Zusammensetzung des am Sensor gemessenen Signals und zur Modifizierung bis hin zur völligen "Maskierung" der Reflexionseigenschaften der Erdoberfläche. Die Effekte sind um so drastischer, je höher der Gehalt der Atmosphäre an Streupartikeln und absorbierenden Gasen ist. Der Grad der Maskierung ist aber auch in starkem Masse von der Aufnahmegeometrie des Systems Sonne-Erdoberfläche-Sensor abhängig.

Da die atmosphärischen Konstituenten hohe Variabilitäten aufweisen, ist die *Fernerkundung der Atmosphäre* der erste Schritt zur *Fernerkundung der Erdoberfläche*. Im DFD werden hochwertige Produkte atmosphärischer Größen, wie z.B. Gesamtozonsäulen, Aerosolverteilungskarten oder Karten des Wasserdampfgehalts erzeugt. Diese Daten dienen als elementare Eingabegrößen für die Atmosphärenkorrektur. Der Zustand der Atmosphäre über einem Untersuchungsgebiet auf der Erdoberfläche zur exakten Zeit des jeweiligen Satellitenüberfluges wird durch verschiedene Verfahren (z.B. physikalisch-chemische Modelle in Kombination mit Assimilationstechniken) ermittelt. Dies ist erforderlich, weil nicht alle zur Korrektur benötigten Daten auch zur selben Tageszeit aufgezeichnet werden.

Die große atmosphärische Variabilität kann bei der Auswertung der Messungen in den verschiedenen Spektralkanälen zu erheblichen Fehlern führen. Tabelle 1 gibt einen Überblick über den möglichen Einfluss der wichtigsten Atmosphärenparameter Ozon, Wasserdampf, Molekülstreuung (Rayleigh) und Aerosolstreuung sowie der Richtungsabhängigkeit der Bodenreflexion und des Sonnenzenitwinkels auf Daten der spektralen Reflektanz (nach POPP, 1993) und des Normalized Differential Vegetation Index (NDVI) der Sensoren TM und AVHRR (nach VERMOTE 1996 und ERBERTSEDER 1998).

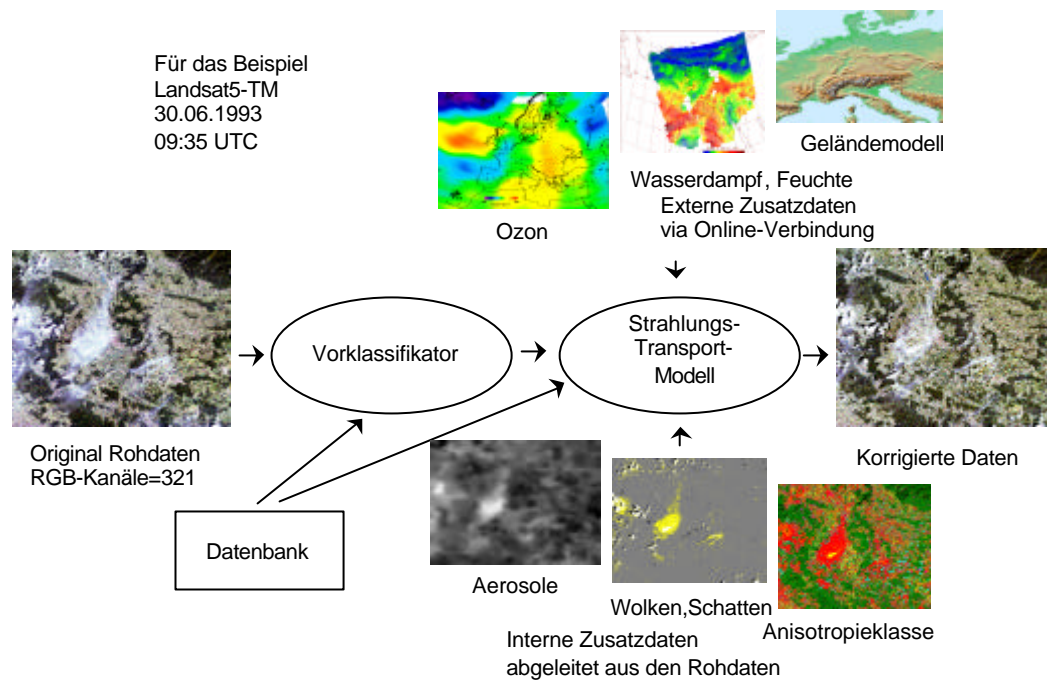


Abb. 1: Schematischer Überblick über das Verfahren

2 Das automatische Korrekturverfahren

2.1 Überblick

Das "DurchBlick"-Verfahren besteht aus 3 wesentlichen Komponenten (siehe Abbildung 1). Eine Vorklassifikation dient der Erkennung von Wolken, Wolkenschatten und Dunstgebieten sowie der Unterscheidung verschiedener Landbedeckungsklassen. Mittels einer Kombination von verschiedenen Schwellwert- und fuzzy-basierten Algorithmen wird eine grobe Vorsortierung der Einzelpixel erreicht. Eine automatische Schnittstelle wird zur Assimilation von externen Zusatzdaten, die im DFD operationell generiert werden, genutzt. So stehen Karten der Verteilungen der Gesamtsäulen von Ozon (aus ERS-2-GOME-Daten) und Wasserdampf (aus NOAA-(A)TOVS-Daten) einschließlich der relativen Luftfeuchte zum Zeitpunkt der Aufnahme des zu untersuchenden Datensatzes sowie ein digitales Höhenmodell (aus verschiedenen interferometrisch verarbeiteten SAR-Daten sowie Standardmodellen wie Globe30) passend zum jeweiligen Bildausschnitt bereit. Ein Strahlungstransportmodell wird zur Invertierung des Satellitensignals in Bodenreflexionsgrade eingesetzt; dabei wird der Einfluss von Rayleigh- und Aerosolstreuung, Absorption durch Wasserdampf und Ozon, Feuchtequellung der Aerosole und die Anisotropie pro Landnutzungsklasse (bidirektionale Reflexionsverteilung am Boden) berücksichtigt. Die notwendige Wolken- und Wolkenschattenmaske sowie die Bodentypkarte werden aus den Ergebnissen der Vorklassifikation gewonnen. Eine Dunstmaske, die Aussagen zur optischen Dicke und zum Typ der Aerosole liefert, wird mittels Strahlungstransportrechnungen an automatisch detektierten "Dunkelfeldern" (z.B. dunkle Vegetation wie dichte Kiefernwälder oder Wasseroberflächen ohne Sonnenspiegelung) aus den Rohdaten abgeleitet.

Die Satelliten-Rohdaten, mit denen DurchBlick arbeiten kann müssen grob (etwa +/- 1 Pixel bzw. +/- 1 Grad) mit der geographischen Position (Länge, Breite) und der Beobachtungsgeometrie (Beobachtungszenit und -azimut) jedes einzelnen Pixels annotiert sein. Als Interpolationsverfahren bei eventueller vorheriger Umprojektion werden allenfalls „nearest neighbour“ Verfahren verwendet. Die Rohdaten müssen multispektral sein und mindestens einen Kanal im sichtbaren Licht und einen weiteren im nahen Infrarot aufweisen. Optimal ist zusätzlich ein Kanal im mittleren Infrarot für eine Optimierung des Dunkelfeldverfahrens sowie ein weiterer Kanal im sichtbaren Licht zur genaueren spektralen Interpolation der aerosoloptischen Dicke. Zu den Beobachtungsdaten muss die genaue Aufnahmezeit bereitgestellt werden, um den Sonnenstand berechnen zu können. Alternativ kann auch der Zenit- und Azimutwinkel der Sonne zu jedem Pixel als zusätzlicher Kanal verwendet werden. Als Ergebnis liefert das Verfahren ein Bild der (atmosphärenkorrigierten) Bodenreflexion unter Berücksichtigung von atmosphärischen Zusatzdaten, anisotroper Reflexionseigenschaften verschiedener Bodentypklassen und der Geländehöhe. Die Messungen aller Sensoren mit solaren Kanälen im atmosphärischen Fenster, die eine mittlere Kanalbreite von 1-100 nm FWHM aufweisen, können mit DurchBlick atmosphärenkorrigiert werden. Derzeit wird im DFD das DurchBlick-Verfahren für die Sensoren NOAA-AVHRR, Landsat-5-TM, Landsat7-ETM+, IRS-1C-LISS und Terra-MODIS vorbereitet. Weitere mögliche Sensoren sind ATSR-2, AATSR, MSS, HRV, MERIS und ATM.

2.2 Vorklassifikation

Die Vorklassifikation besteht aus zwei Algorithmen: „spektrale Signaturanalyse“ und „geometrische Strukturanalyse“. Bei der spektralen Signaturanalyse erfolgt eine Zuweisung der Pixel auf der Grundlage generalisierter Modellspektren für fernerkundbare Objekte entsprechend vorab ermittelter Zugehörigkeitswahrscheinlichkeiten. Die für diese Analyse erforderlichen Modellspektren und Sensorspezifikationen sind in einer Datenbank gespeichert. Basierend auf diesen Informationen erfolgt eine Identifikation geeigneter Landnutzungstypen (Laub- und Nadelwald, unbedeckter und bedeckter Boden, Wasser, Siedlung, verschiedene landwirtschaftliche Flächen; Klassen Agrar 1-4 in Abbildung 2) für die dann bei der Korrekturrechnung eine geeignete Funktion zur Modellierung der anisotropen Bodenreflexion ausgewählt wird. Weiterhin werden Wolken, Dunst, und Wolken Schatten durch die spektrale Signaturanalyse als "sichere" Klassen erfasst. Darüber hinaus wird pixelbezogen die Zugehörigkeitswahrscheinlichkeit zu den verschiedenen Klassen bereitgestellt, so dass jederzeit auf dieser Grundlage eine Neuordnung falsch zugewiesener Pixel erfolgen kann.

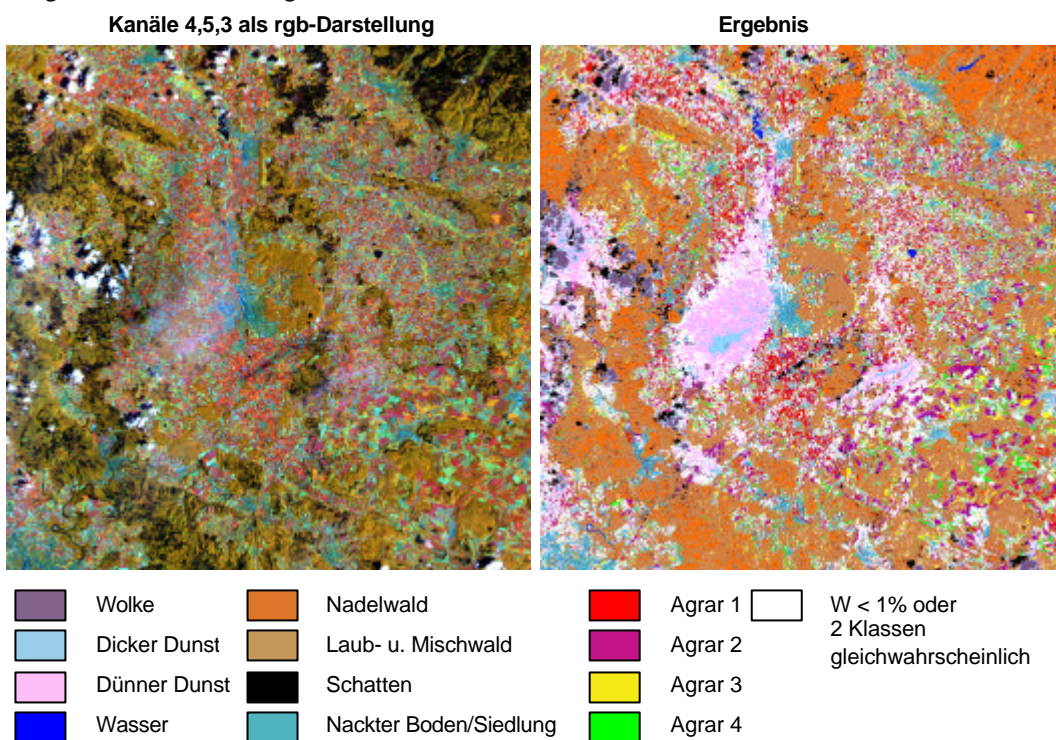


Abb. 2: Eingabedaten und Ergebnisdaten der Vorklassifikation

Die geometrische Strukturanalyse umfasst eine Homogenitätsanalyse, eine Gebietsgrößen- und Formanalyse sowie eine Nachbarschaftsanalyse identifizierter Referenzgebiete. Verschiedenen Analysen haben gezeigt, dass die Einbeziehung strukturanalytischer Ansätze

zu einer verbesserten Bildauswertung beitragen kann (BORG ET AL., 1998; BORG UND FICHELTMANN, 1998). Das Ziel ist hier die Erfassung von Misch- und Störpixeln, die gesondert bezüglich ihrer Zugehörigkeit zu den angrenzenden Objekten behandelt werden.

Abbildung 2 zeigt ein Ergebnis der Vorklassifikation (Landsat-5 TM-Teilszene). In der Szene wurden undurchsichtige Wolken, noch durchsichtiger dicker Dunst und stark durchsichtiger Dunst codiert. Dabei zeigt sich, dass auch hochliegende Zirkuswolken in der Mitte der Abbildung durch den Algorithmus als dicker bzw. dünner Dunst ausgewiesen werden. Es wird ebenfalls ersichtlich, wie in den wolken- und dunstfreien Gebieten die Zuordnung zu verschiedenen Landnutzungsklassen erfolgt. Als Basis dienen die Rohdaten, umgerechnet in spektrale Reflektanzen am Oberrand der Atmosphäre, wodurch die Algorithmen auf äquivalente Sensorkanäle anderer Sensoren einfach übertragbar sind.

2.3 Gewinnung der Zusatzdaten

Vor der Korrektur erfolgt die pixelweise Bereitstellung der benötigten Zusatzdaten. Dazu werden Resultate der Vorklassifikation als interne Zusatzdaten verwendet. Das Verfahren bereitet die über eine Schnittstelle (Online über WWW oder CD-ROM) vom Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) bereitgestellten Atmosphärendaten als externe Zusatzdaten für die weitere Verwendung auf. Die Aerosoloptische Dicke und dessen Typ werden in sichtbaren Kanälen über den in mittleren Infrarot liegenden Kanälen automatisch ermittelten Referenzflächen durch die oben erläuterte Dunkelfeldmethode ermittelt. Mit geeigneten Interpolationsroutinen aus der Datenbank wird diese Information dann auf alle Pixel der verschiedenen Spektralkanäle übertragen. Als Ergebnis entsteht eine Trübungsmaske. Bei der räumlichen Interpolation werden die von der Vorklassifikation ermittelten zusammenhängenden Gebiete ähnlicher Atmosphärenbedingungen berücksichtigt. Die jeweilige Bodentypklasse wird zur Auswahl der geeigneten Modellfunktion der anisotropen Reflexionseigenschaften verwendet (Bodenmaske). Von der Vorklassifikation bestimmte Wolken- und Schattengebiete werden als „nicht zu korrigierende Pixel“ in einer Ausschlussmaske indiziert.

Tab. 2: Quellen der benötigten Zusatzdaten und deren derzeit erreichte Genauigkeit

Abzuleitender Parameter	Methodik	Erreichte Genauigkeit
Wolken, Schatten	Ergebnis aus der Vorklassifikation der Rohdaten	-
Aerosol: Menge / Typ	Ergebnis aus der multispektralen Inversion über automatisch ermittelten und charakterisierten Dunkelfeldern in den Rohdaten	< 0.1 / -
Ozon	Absorptionsspektroskopie und Datenassimilation aus Satellitensensoren GOME, SCIAMACHY, GOME2	< 20 D. U.
Wasserdampf	Profilretrieval und Interpolation aus Satellitensensoren TOVS, ATOVS, MODIS, MSG	< 1 g cm ⁻²
Digitales Höhenmodell	GLOBE30-Datensatz; Künftig differentielle Interferometrie aus SAR-Daten	<100m
Anisotropie der Bodenreflexion	Kriebel et al., 1977, 7 Klassen, zugeordnet nach den Ergebnissen der Vorklassifikation	-

Über eine Online-Schnittstelle oder via CD-ROM werden Ozon- und Wasserdampfgesamtsäulen, die operationell täglich aus Satellitendaten im DFD abgeleitet wurden, bereitgestellt. Mit geeigneten Assimilationsverfahren wie z. B. dem Kalmanfilter (BITTNER ET AL., 1998) werden diese Messungen anschließend auf den Zeitpunkt und den geographischen Ort der Rohdaten interpoliert und in Spurengasmasken abgelegt. Über die selbe Schnittstelle wird ein geeigneter Ausschnitt eines digitalen Höhenmodells erhoben und auf die jeweilige Geometrie der zu korrigierenden Szenen umprojiziert. Es werden somit pixelweise folgende Zusatzdaten bestimmt: Trübungsmaske, Bodenmaske, Ausschlussmaske, Spurengasmasken und Geländemodell.

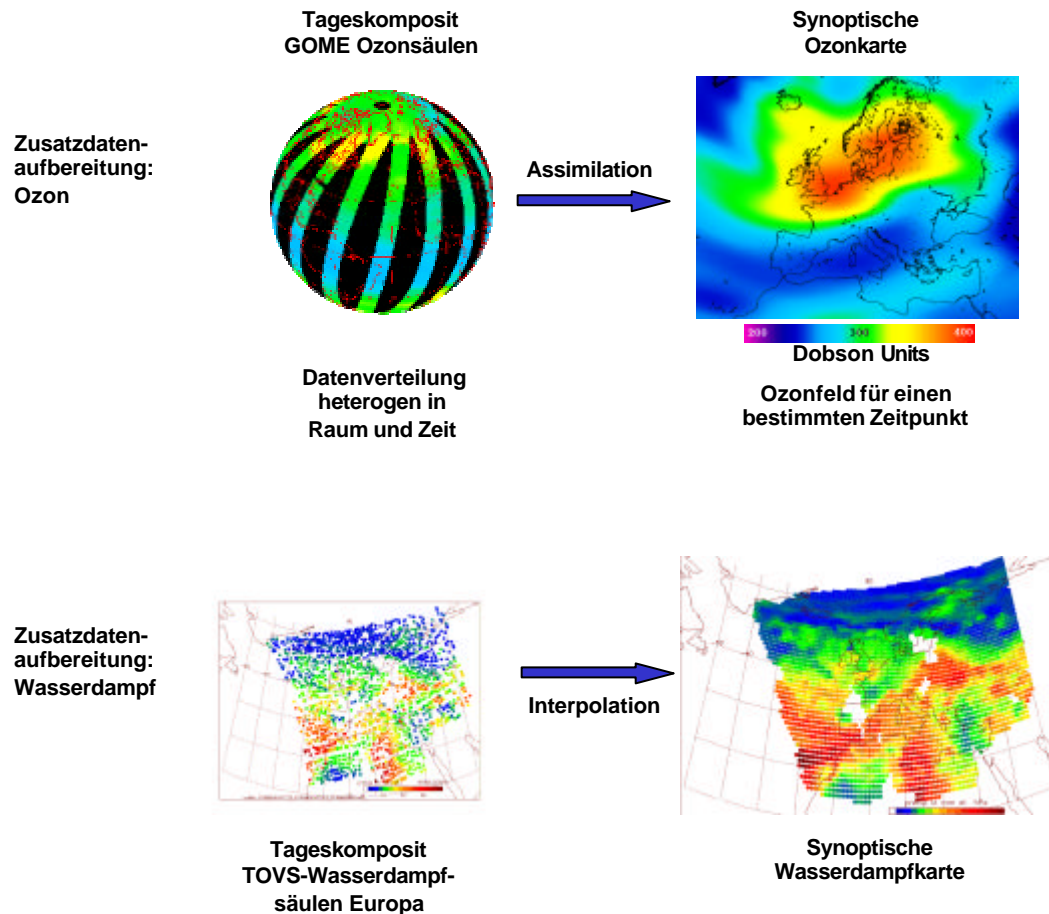


Abb. 3: Beispiel für die Gewinnung von Bildmasken der atmosphärischen Zusatzdaten Ozonsäulengehalt (oben) und Wasserdampfsäulengehalt (unten)

Als Basismessungen für die benötigten Zusatzdaten kommen die in Tabelle 2 aufgelisteten Sensoren in Frage. Vergleicht man die aufgelistete, derzeit erreichte Genauigkeit mit den Anforderungen (letzte Zeile von Tabelle 1), so ist ersichtlich, dass die verfügbaren Zusatzdaten den Anforderungen durchaus genügen. Verbesserungen in der räumlichen und

zeitlichen Auflösung (und damit der Genauigkeit bei kleinskaligen Extremwerten) sind durch die nächste Generation von Satellitensensoren zu erwarten.

Ein Beispiel der atmosphärischen Zusatzdaten über Europa aus operationellen DFD-Prozessketten zeigt Abbildung 3. Aus den mit dem Global Ozone Monitoring Experiment (GOME) gemessenen Ozonsäulen in Dobson Einheiten (engl. Dobson Units, D.U.) eines Tages entlang der Umlaufbahnen des ERS-2 Satelliten (linkes Bild oben) wurde mit Hilfe des Kalman-Filters die globale Ozonverteilung für einen frei wählbaren Zeitpunkt bestimmt (rechtes Bild oben). Der Wasserdampfgehalt der Atmosphäre wird aus Messungen des NOAA-TIROS Operational Vertical Sounders (TOVS) oder des Advanced TOVS (ATOVS; Li et al. 2000) gewonnen. Im linken unteren Bildteil sind die einzelnen (A)TOVS-Messungen mit Kästchen markiert. Ihre Farbe repräsentiert die Wasserdampfsäule (engl. precipitable water) in mm. Im rechten unteren Bildteil ist das aus den Einzelmessungen interpolierte Feld des Wasserdampfgehalts zu sehen. Zur Interpolation wurde eine abstandsgewichtete Mittelung durchgeführt.

2.4 Korrekturrechnung

Bei der Korrekturrechnung wird die pixelweise Korrektur aller nicht in der Ausschlussmaske markierten Pixel mit Hilfe der Zusatzdaten durchgeführt. Alle Zusatzdaten liegen dabei als Masken für die zu korrigierende Szene vor. Für die Korrektur werden mit dem Strahlungstransportprogramm SOS (NAGEL ET AL., 1978) vorab berechnete Lookup-Tabellen verwendet. SOS zeichnet sich nach unseren Erfahrungen insbesondere durch Schnelligkeit bei gleichzeitig guter Genauigkeit aus.

Zunächst wird so für jedes Pixel der Rohdaten eine Umrechnung des am Oberrand der Atmosphäre gemessenen Wertes in einen Reflexionskoeffizienten am Boden durchgeführt. Dabei werden die Pixelwerte der Trübungsmaske, der Bodenmaske, der Spurengasmaske und des Höhenmodells verwendet. Außerdem berücksichtigt wird die Anisotropie der Reflexion an der Erdoberfläche durch Verwendung einer geeigneten Modellfunktion (KRIEBEL 1977) für jeden in der Vorklassifikation bestimmten Bodentyp. Für hochauflösende Sensoren ist außerdem eine Korrektur der Einstrahlung in das Gesichtsfeld des Sensors aus benachbarten Pixeln notwendig. Hierfür wird ein einfacher Filter unter Verwendung der Trübungsmaske (Ansatz nach KAUFMAN 1984) eingesetzt.

Ein Beispiel für die Atmosphärenkorrektur des Einflusses von Aerosolen, Ozon und Wasserdampf gibt Abbildung 4. Eine Landsat-Teilszene vom 30. Juni 1993 im Raum Göttingen wurde beispielhaft korrigiert. Auf der linken Bildseite ist die unkorrigierte Landsat-Szene zu sehen, auf der rechten Bildseite die atmosphärenkorrigierte Szene. Deutlich kann man die kontrastreichere Signatur (z. B. in Waldgebieten) erkennen. Nach der Atmosphärenkorrektur weiterhin bestehende Farbunterschiede sind auf verbleibende Zirreneinflüsse zurückzuführen. Deutlich ist aber auch zu sehen, wie die Atmosphärenkorrektur die Helligkeitsunterschiede der verschiedenen Szenenbereiche sichtbar reduziert. Multitemporale Analysen sind somit auch auf quantitativer Basis möglich.

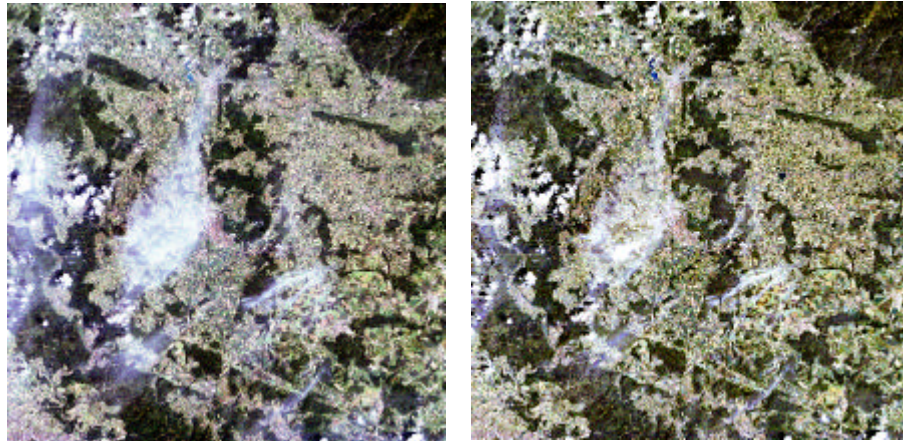


Abb. 4: Originalbild (RGB=321) und Korrekturergebnis einer Landsat-5-Teilszene

3 Diskussion und Ausblick

Ein Demonstrator des Verfahrens, der aus einer Reihe noch nicht verbundener automatischer Teilmodule besteht, wurde implementiert. Insbesondere werden operationelle Zusatzdaten zur genauen Charakterisierung des Atmosphärenzustandes aufbereitet. Es wurden eine Reihe von Testdaten verschiedener Sensoren (TM, ETM+, MODIS, AVHRR, LISS) durch Anwendung von DurchBlick erfolgreich korrigiert und so die grundsätzliche Funktionalität aufgezeigt. Gegenwärtig wird das Verfahren optimiert und validiert. Im Rahmen einer Industriekooperation soll das zum Patent angemeldete Verfahren (HOLZER-POPP ET AL. 1999) dann vollautomatisch implementiert werden.

Durch den zunehmenden Bedarf an flächendeckenden quantitativen Datenbeständen zur Integration in Umweltmodelle wird die Atmosphärenkorrektur von Fernerkundungsdaten in den nächsten Jahren weiter an Bedeutung gewinnen. Dieser Bedarf wird nur dann gedeckt werden können, wenn die Atmosphärenkorrektur wissenschaftsbasiert, automatisiert und unmittelbar in die Produkterstellung eingebunden wird. Auf diese Weise ist eine schnelle Datenbereitstellung in hoher Qualität für den Nutzer möglich. Außerdem können die bisher notwendigen Bodenmessungen bzw. die dadurch entstehenden Kosten minimiert werden. DurchBlick wurde für diesen Ansatz konzipiert.

Der vorgestellte Prozessor zur automatischen Atmosphärenkorrektur ist geeignet, um in Prozessketten zur Produkterstellung eingebunden zu werden. Neu an diesem Verfahren ist die Verknüpfung einer empirischen, ereignisgesteuerten Vorklassifikation, auf deren Ergebnisse die eigentliche Korrektur aufbaut sowie die Einbeziehung flächendeckender Informationen zum aktuellen Atmosphärenzustand (z.B. Ozon, Wasserdampf, Aerosole, Wolken), die aus externen Zusatzdaten oder direkt aus den Fernerkundungsdaten abgeleitet werden. Interaktive Eingriffe in den Prozessor oder zusätzliches Expertenwissen sind nicht mehr notwendig. Alle Module des neuen Prozessors existieren und sind getestet; es bleibt die Integration in ein anwendungsspezifisches Gesamtsystem.

4 Literatur

- Bittner, M., S. Dech, and W. Balzer (1998): *Ozonkartierung per Satellit*, Spektrum der Wissenschaft, Heft 9, 54-61.
- Borg, E., Fichtelmann, B. (1998): *Vergleichende Analyse von Formindizes zur Charakterisierung von Landschaftsobjekten unter ökologischen Aspekten*, ZPF 66, 66-78.
- Borg, E., Steiner, N., Vajen, H.-H. (1998): *Nutzung von Daten des russischen Fernerkundungssatelliten OKEAN zur Erkundung des Meereises*, ZPF, 66, 3, 108-119.
- Erbertseder, T. (1998): *Quantifizierung von atmosphärischen Einflüssen auf NOAA-AVHRR NDVI-Daten und deren Korrektur*, Diplomarbeit, Ludwig-Maximilians-Universität München.
- Holzer-Popp, T., Bittner, M., Borg, E., Dech, St., Erbertseder, Th., Fichtelmann, B., Schroedter, M. (1999): *Verfahren zur automatischen Atmosphärenkorrektur multispektraler Fernerkundungsdaten* - Patentanmeldung vom 16.07.1999 unter der Nummer 99113927.
- Kaufman, Y. (1984): *Atmospheric effect on spatial resolution of surface imagery*, Appl. Opt., 23, 4164-4172.
- Kriebel, K. T. (1977): *Reflection properties of vegetated surfaces: Tables of measured spectral biconical reflectance factors*, Wiss. Mitt., Universität München.
- Li, J., Wolf, W. W., Menzel, W. P., Zhang, W., Huang, H.-L., Achtor, T. H. (2000), *Global Soundings of the Atmosphere from ATOVS Measurements: The Algorithm and Validation*, J. Appl. Met., 39, 1248-1268
- Nagel, M.R., Quenzel, H., Kweta, H., Wendling, P. (1978): *Computation of luminance distribution in the sky*, in: Daylight illumination-color-contrast tables, Academic Press, New York.
- Popp, T. (1993), *Korrektur der atmosphärischen Maskierung zur Bestimmung der spektralen Albedo von Landoberflächen aus Satellitenmessungen*, Dissertation, Universität München.
- Popp, T. (1995): *Correcting atmospheric masking to retrieve the spectral albedo of land surfaces from satellite measurements*, Int. J. Rem. Sens., 16, 3483-3508.
- Rahman, H. & Dedieu, G. (1994): *SMAC: A simplified method for atmospheric correction of satellite measurements in the solar spectrum*, Int. J. Rem. Sens., 15, 1, 123-143.
- Richter, R (1996): *Atmospheric correction of satellite data with haze removal including a haze/clear transition region*, Computers & Geosciences, 22, 675-681.
- Richter, R. (1997): *Correction of atmospheric and topographic effects for high spatial resolution satellite imagery*, Int.J. Rem. Sens., 18, 5, 1099-1111.
- Vermote, E.F., D. Tanré, J.L. Deuzé, M. Herman, J.J. Morcrette (1997): *Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview*, IEEE Trans. Geosc. and R. Sens., 35, 3, 675-686.
- Vermote, E.F. (1996): *Atmospheric Correction Algorithm: Spectral Reflectances (MOD09)* - MODIS Algorithm Technical Background Document, NASA.