

Lässt sich die Aerosolbelastung von Stadtgebieten aus Satellitenbildern ableiten?

Christian Schmidt, Astrid Ziemann und Uwe Schlink

Summary

The use of contrast reducing Mie scattering for the derivation of aerosol optical thickness (AOT) of the atmosphere is described in this article. With the aid of Differential Texture Analysis (DTA) the contrast between two visual satellite images will be determined and the AOT will be deduced. An assessment of the DTA algorithm with Landsat 5 TM satellite images for the Munich area is presented here. Problems like false AOT values caused by surface albedo changes and uncertainties in pollution loading are discussed, and proposed solutions will also be presented. Two methods for solving these difficulties, the histogram method and the regression method, will be displayed.

Zusammenfassung

Zur Ableitung der Aerosol optischen Dicke (AOT) der Atmosphäre erweist sich die kontrastreduzierende Wirkung der Mie-Streuung an Aerosolpartikeln als nützlich. Zwischen zwei unterschiedlich belasteten visuellen Satellitenbildern wird mit Hilfe der Differentiellen Texturanalyse (DTA) der Kontrastunterschied beider berechnet und daraus die AOT abgeleitet. In dieser Arbeit geht es um die Bewertung des DTA-Algorithmus' anhand von Landsat 5 TM Satellitenbildern vom Großraum München. Im Folgenden werden auch Probleme des DTA-Codes, wie z.B. falsch detektierte AOT auf Grund von Änderungen der Bodenalbedo und zu niedrig ermittelte AOT-Werte bedingt durch Ungereimtheiten der Belastungssituationen der Satellitenbilder, diskutiert und Lösungsvorschläge, u.a. die Histogramm- und Regressionsmethode, präsentiert.

1 Motivation

Relativ hoch aufgelöste Satellitenbilddaufnahmen der Landoberfläche gibt es seit den 1970er Jahren. Während in früheren Zeiten der Aerosolgehalt nur qualitativ beurteilt werden konnte, ist es heutzutage auch möglich, spezifische optische Eigenschaften von Aerosol (hier nur Staubpartikel behandelt) (z.B. Streuphasenfunktionen) abzuleiten und den Strahlungsantrieb von Partikeln in Bezug auf das Klima abzuschätzen (*Chu et al., 2003; Kaufmann et al., 2000a*).

Die Auswirkungen von Aerosolen sind vielfältig. Sie üben direkte und indirekte Effekte auf den Strahlungshaushalt des Systems Erde - Atmosphäre aus. Im Strahlungssinn schwarze Aerosole absorbieren Strahlung und heizen damit die Schicht auf, in der sie sich befinden. Im Strahlungssinn weiße Aerosolpartikel reflektieren solare und/oder terrestrische Strahlung und bewirken damit eine Abkühlung ihrer Umgebung. Indirekt den Strahlungshaushalt beeinflussend, agieren Aerosole als Wolkenkondensationskerne. Auf Grund ihrer vielfältigen Wirkungen und Auswirkungen werden Aerosole in den aktuellen wissenschaftlichen Veröffentlichungen als die Basis der größten Unsicherheit beim Antrieb des Klimawandels angesehen (*King et al., 1992; Bernstein et al., 2008*).

Die Quellen für Staubpartikel sind verschiedenartig, angefangen mit anthropogenen Emissionen durch industrielle Aktivität, Biomasseverbrennungen, z.B. im tropischen Regenwald oder in den Steppenlandschaften der gemäßigten Breiten, Seesalz-Aerosol von platzenden Wasserbläschen bis hin zu windgetragenen Staub aus Wüstengebieten. Auf Grund der in der Regel kurzen Verweil- und Lebensdauer (wenige Stunden bis ein paar Tage) in der Atmosphäre und der damit verbundenen räumlichen Variation der Aerosolkonzentration werden Satellitenfernerkundungen benötigt. Bodenstationen können keine globalen Trends im Aerosolbudget feststellen, sie sind nur als lokal repräsentativ anzusehen (*Kaufmann et al., 1997*). In Zukunft ist ihre Aufgabe vermehrt die Kalibrierung der Satellitenmessungen.

Den eigentlichen Anstoß für diesen Artikel und zu einer Diplomarbeit (*Schmidt, 2009*) gab die Diplomarbeit von Andreas Harbusch aus dem Jahr 2005 mit dem Thema „Anwendung und Validierung eines Verfahrens der Satellitenbilddauswertung zur Bestimmung der Feinstaubbelastung in München und Umgebung“. In seiner Diplomarbeit benutzte Harbusch zur Fernerkundung von bodennahem Feinstaub bereits die Differentielle Texturanalyse, kurz DTA. Der DTA-Algorithmus ist in die ICAROS NET Plattform (Integrated Computational Assessment of urban air quality via Remote Observation Systems NETWORK) integriert (*Harbusch, 2005*). Die ICAROS NET Software war Teil des von der Europäischen Union geförderten ICAROS NET Projektes, in dem mehrere europäische Nationen involviert waren. Aufwändig wurden für Deutschland im Großraum München Bodenmesskampagnen (im Winter- und Sommerhalbjahr) durchgeführt. Mithilfe der Ergebnisse wurden letztendlich drei Landsat 5 TM Satellitenbilder ausgewählt, um mit der ICAROS NET Software die PM_x -Bodenmesswerte zu reproduzieren. Anhand der Originalliteratur wurde der DTA-Algorithmus in MATLAB nachprogrammiert und Harbuschs Ergebnisse nachvollzogen. Darüber hinaus werden in der vorliegenden Arbeit Verbesserungen des DTA-Algorithmus' präsentiert.

2 Theoretischer Überblick

Die Aerosol optische Dicke (AOT) lässt sich in folgende Komponenten zerlegen:

$$\tau = \tau_g^{abs} + \tau_a^{abs} + \tau_g^{str} + \tau_a^{str} \quad (1)$$

Hierbei bedeuten τ_g^{abs} optische Dicke durch molekulare Absorption, τ_a^{abs} optische Dicke hervorgerufen durch Partikelabsorption, τ_g^{str} optische Dicke bedingt durch Streuung an Molekülen und τ_a^{str} optische Dicke ausgelöst von streuenden Partikeln in der Atmosphäre (*Sifakis et al., 1992*). Der Einfluss der Absorption durch Gase in der Atmosphäre ist im visuellen Bereich (400 nm - 700 nm) vernachlässigbar. Die Absorption an Partikeln in der Atmosphäre wird als zeitlich konstant angenommen und ist im visuellen und nahen infraroten Spektralbereich zudem vernachlässigbar klein, unter der Voraussetzung, dass nur wenige oder

keine schwarzen Aerosolpartikel (z.B. Ruß) vorhanden sind.

Die Streuung an Molekülen wird mit der Theorie von Rayleigh beschrieben. Sie besagt, dass die Intensität der gestreuten Strahlung wellenlängenabhängig ist ($\propto \lambda^{-4}$) (kurzwellige Strahlung wird intensiver gestreut als langwellige). Rayleigh-Streuung ist aber einerseits invariabel in der Zeit, denselben atmosphärischen Druck vorausgesetzt, und andererseits macht man sich das Vorhandensein eines „atmosphärischen Fensters“ zu Nutze. In diesem üben Gase, wie zum Beispiel Wasserdampf oder Kohlendioxid, kaum oder nur wenig Einfluss auf die Strahlung aus (die Absorption durch Gasmoleküle ist in diesem Spektralbereich vernachlässigbar klein) (Vermote et al., 2006).

Nun bleibt nur noch die Streuung an Partikeln übrig. Sie wird mit der Theorie von Mie beschrieben. Mie-Streuung ($\propto \lambda^{-n}$ mit $1,2 \leq n \leq 1,4$) findet vor allem an Partikeln im Akkumulationsbereich ($0,08 \mu\text{m} - 2,5 \mu\text{m}$) statt. Größere Partikel verursachen nicht-selektive Streuung, diese ist unabhängig von der Wellenlänge und damit für die Fernerkundung von Feinstaub unbrauchbar. Die AOT ist deshalb ein Anzeiger für die Belastung der Atmosphäre mit Feinstaub.

Die größte Konzentration an urbanen Feinstäuben kommt in der Mischungsschicht (MLH, engl. Mixing Layer Height) vor, da hier die meisten Quellen für Feinstaub angesiedelt sind und der vertikale Austausch mit der freien Atmosphäre eingeschränkt ist (Schäfer et al., 2005).

Zur Fernerkundung von bodennahem Feinstaub muss zunächst die von Deschamps et al. (1981) aufgestellte Strahlungstransfergleichung (Gl. 2) für die verschiedenen Strahlungswege im System Atmosphäre - Erde formuliert und anschließend invertiert werden.

$$\rho^* = \frac{\pi L}{\mu_s E_s} \quad (2)$$

Dabei ist L die gemessene spektrale Strahldichte in $\frac{W}{m^2 \mu\text{m} sr}$, E_s die spektrale solare Strahlungsflussdichte am Oberrand der Atmosphäre (TOA, engl. Top of Atmosphere) in $\frac{W}{m^2 \mu\text{m}}$ und $\mu_s = \cos(\theta_s)$, wobei θ_s der solare Zenitwinkel ist. Die Sonne wird hierbei als isotroper Strahler angenommen, so dass die Reflektanz ρ^* einheitenlos ist (Deschamps et al., 1981). ρ^* setzt sich nun wie folgt zusammen:

$$\rho^* = \rho_a(\tau, \theta_s, \theta_v, \phi, \omega_0) + \frac{\rho}{1 - \rho \cdot S} T(\theta_s, \tau, \omega_0) \cdot T(\theta_v, \tau, \omega_0) \quad (3)$$

Dabei steht $\rho_a(\tau, \theta_s, \theta_v, \phi, \omega_0)$ für die atmosphärische Reflektanz, welche von der AOT τ , dem solaren Zenitwinkel θ_s , dem Aufnahmezenitwinkel θ_v , dem Azimut ϕ und der Einfachstreueralbedo ω_0 abhängt. Des Weiteren sind ρ die Bodenreflektanz eines homogenen, ausgedehnten Ziels (Lambert'scher Reflektor: Durchmesser $> 1 \text{ km}$), S die sphärische Albedo der Atmosphäre, $T(\theta_s, \tau, \omega_0) = \exp(-\tau/\mu_s) + t_d(\theta_s, \tau, \omega_0)$ die totale Transmission (direkte + diffuse) der bodenwärts und $T(\theta_v, \tau, \omega_0) = \exp(-\tau/\mu_v) + t_d(\theta_v, \tau, \omega_0)$ die totale Transmission (direkte + diffuse) der himmelwärts gerichteten Strahlung (Sifakis et al., 1992).

In der Satellitenfernerkundung werden aber auch Objekte kleiner Dimension untersucht, die nicht einfach als Lambert'scher Reflektor approximiert werden können. Mit anderen Worten, die Bodenreflektanz ρ hängt nun von den Gegebenheiten des eigentlichen Ziels M und von der Beobachtungsrichtung des Satellitensensors und der Einfallsrichtung der solaren Strahlung ab. Diese Tatsache hat zur Folge, dass Adjazenz-/Umwelteffekte des Ziels zusätzlich mit Beachtung finden müssen. Die bislang homogene Bodenreflektanz ρ wird deshalb in die eigentliche Bodenreflektanz des Ziels $\rho(M)$ und die Reflektanz der Umgebung/Umwelt des Zielobjekts ρ_e aufgeteilt (Vermote et al., 2006).

Für Ziele mit einem Durchmesser $< 1 \text{ km}$, die nicht mehr als Lambert'scher Reflektor angenähert werden können, wird Gleichung 3 mit $T(\theta_v, \tau, \omega_0) = \exp(-\tau/\mu_v) + t_d(\theta_v, \tau, \omega_0)$ und $\rho = \rho(M) F(r) + [1 - F(r)] \rho_e$, ($F(r)$ =Umweltfunktion) wie folgt abgewandelt (Sifakis et al., 1992; Vermote et al., 2006):

$$\rho^* = \rho_a + \rho(M) \frac{T(\theta_s, \tau, \omega_0) \cdot \left[e^{-\frac{\tau}{\mu_v}} + F(r) \cdot t_d(\theta_v, \tau, \omega_0) \right]}{1 - \rho_e \cdot S} + \rho_e \frac{T(\theta_s, \tau, \omega_0) \cdot [1 - F(r)] t_d(\theta_v, \tau, \omega_0)}{1 - \rho_e \cdot S} \quad (4)$$

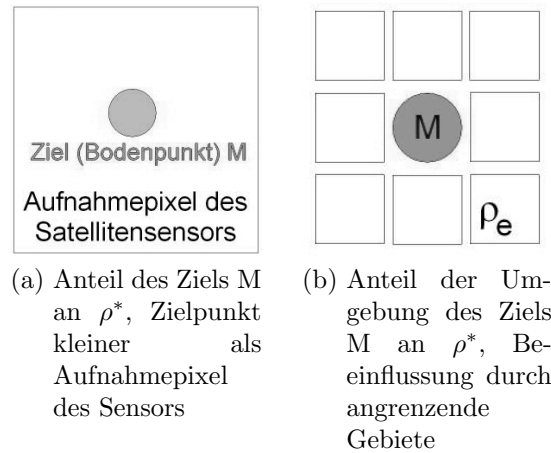


Abb. 1: Zur Erläuterung von Gleichung 4

Der zweite Term in Gleichung 4 repräsentiert den Anteil des Ziels (siehe Abbildung 1a), der dritte Term den Anteil der Umgebung des Ziels (siehe Abbildung 1b) an der gemessenen Reflektanz.

Die Umweltfunktion ist ein Gewichtungsfaktor (Tanré et al., 1981). Sie gibt den Anteil der Fläche des Zielgebiets M im Aufnahmepixel des Sensors an (Bild 1a). Die Umweltfunktion $F(r)$ ist von der Dimension des Ziels abhängig. Die Wirkung der Adjazenz-/Umwelteffekte kommt erst bei Zieldimensionen größer als einige hundert Meter zum Vorschein. Mit Zieldimension ist in diesem Zusammenhang die räumliche Auflösung der Bodenoberfläche des Satellitensensors gemeint (siehe Abb. 1a). Zum Beispiel besitzt Landsat 5 TM eine Bodenauflösung von $r = 30 \text{ m}$ im Durchmesser. Ist die Auflösung des Fernerkundungssensors nur einige hundert Meter genau, d.h. einzelne Gebiete auf der Erdoberfläche werden nur sehr grob aufgelöst, kann durch Streuung an benachbarten Gebieten die gemessene Reflektanz ρ^* des eigentlichen Bodenpixels verfälscht werden.

Bei entsprechend hochauflösenden Satellitensensoren wie Landsat 5 und 7 TM ($r = 30 \text{ m}$) oder auch SPOT ($r = 10 \text{ m}$) ist die Thematik der Adjazenzeffekte damit vernachlässigbar und $F(r) \approx 0$ (Tanré et al., 1991). Damit folgt aus Gleichung 4:

$$\rho^* = \rho_a + \rho(M) \frac{T(\theta_s, \tau, \omega_0) \cdot e^{-\frac{\tau}{\mu_v}}}{1 - \rho_e \cdot S} + \rho_e \frac{T(\theta_s, \tau, \omega_0) \cdot t_d(\theta_v, \tau, \omega_0)}{1 - \rho_e \cdot S} \quad (5)$$

Gleichung 5 ist der Basisansatz mehrerer AOT Fernerkundungsverfahren, wobei in diesem Artikel nur auf den DTA-Algorithmus näher Bezug genommen wird.

Zur Fernerkundung der bodennahen AOT macht man sich die Streuung an Aerosolpartikeln zu

Nutze. Aufgrund der gestreuten Strahlung wird der Kontrast im Satellitenbild reduziert. Der DTA-Algorithmus (Differentielle Texturanalyse) nutzt diese kontrastreduzierende Wirkung aus. Dies impliziert, dass mindestens zwei Satellitenbilder benötigt werden. Ein unbelastetes Bild, welches als Referenzbild genommen wird und ein oder mehrere feinstaubbelastete Aufnahmen. Die Satellitenbilder sollten, um die Gefahr von Bodenalbedoänderungen einzudämmen, nicht weiter als maximal vier Wochen auseinander liegen oder aus der gleichen Vegetationsperiode stammen. Der DTA-Algorithmus kann zwischen Kontrastunterschieden, verursacht durch Streuung an Aerosolpartikeln und Kontrastunterschieden verursacht durch Veränderungen der Bodenalbedo (z.B. Landnutzungsänderungen), nicht unterscheiden.

Von Gleichung 5 ausgehend wird der Kontrast aus der Standardabweichung $\sigma(\rho^*)$ bestimmt. Die Standardabweichung wird jeweils für einen sog. Superpixel, der aus etwa 10×10 bis 20×20 Einzelpixeln bestehen kann und pixelweise durch das gesamte Bild läuft, berechnet. Für die räumliche Standardabweichung $\sigma(\rho^*)$ folgt aus Gleichung 5 und der Annahme, dass ρ_a und ρ_e räumlich konstant sind, $\sigma(\rho^*) = \sigma(\rho(M)) (T \cdot \exp(-\tau/\mu_v)) / (1 - \rho_e \cdot S)$. Daraus folgt die Basisgleichung des DTA-Codes:

$$\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1 = \ln \left[\frac{\sigma_1(\rho_1^*)}{\sigma_2(\rho_2^*)} \right]. \quad (6)$$

Hierbei ist ρ^* die vom Satelliten gemessene Reflektanz des Systems Erdboden-Atmosphäre, jeweils für die beiden Satellitenaufnahmezeiten (1 und 2).

Wie bereits oben erwähnt, wird die Bodenreflektanz ρ als zeitlich konstant, aber räumlich variabel angenommen. Diese Vereinfachung birgt gewisse Risiken, wie später im Text noch deutlich wird.

Der Vergleich von Standardabweichungen kann auch zu Fehlinterpretationen führen. Die ganzzahligen Reflektanzwerte einer Satellitenbildszene gehorchen näherungsweise einer Poissonverteilung, deren Erwartungswert (Mittelwert) und Varianz gleich sind. Um o.g. Fehlinterpretationen zu vermeiden, normiert man die Standardabweichungen mit deren Mittelwerten und erhält den Variationskoeffizienten $\frac{\sigma_i(\rho_i^*)}{\rho_i^*}$.

Gleichung 6 wird damit ersetzt durch:

$$\Delta\tau = \ln \left[\frac{\sigma_1(\rho_1^*)}{\rho_1^*} - \frac{\sigma_2(\rho_2^*)}{\rho_2^*} \right]. \quad (7)$$

Der Mittelwert der gesamten Reflektanz in Gleichung 7 bezieht sich jeweils auf den Superpixel.

3 Eigenschaften und Charakteristika des DTA-Algorithmus'

3.1 Grundlegende Machbarkeitstests

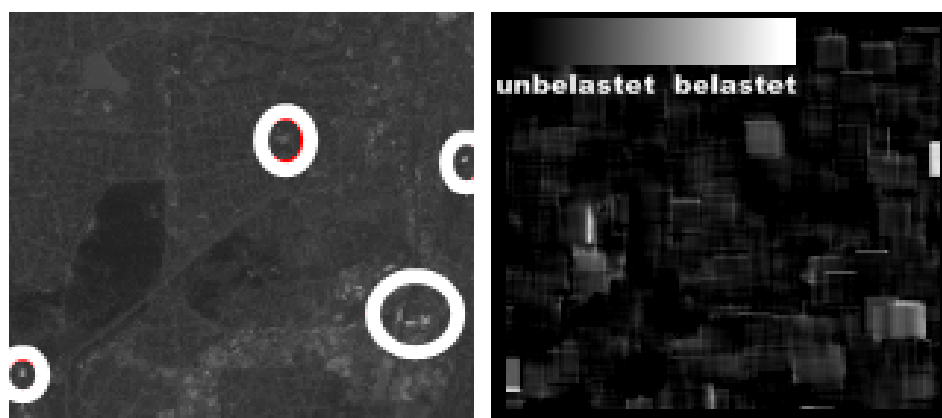
Mit einer handelsüblichen Digitalkamera wurde getestet, in welchen Wellenlängen die jeweiligen Partikelgrößen am besten zu erkennen sind und inwieweit die Untergrund- bzw. Oberflächenbeschaffenheit auf die Detektion von Feinstaub Einfluss nimmt (*Schmidt, 2009*). Als Aerosolquellen dienten jeweils eine qualmende Kerze und eine brennende Zigarette. Bei der anschließenden AOT-Berechnung stellte sich heraus, dass die Aufnahmen der Digitalkamera verrauscht waren, das Rauschen bei der AOT-Berechnung verstärkt wurde

und dadurch teilweise AOT-Informationen verloren gingen. Ausgehend von Gl. 6 ergibt die Größtfehlerabschätzung: $d\Delta\tau = d \ln \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right) = \left| \frac{d\sigma_2}{\sigma_2} \right| + \left| \frac{d\sigma_1}{\sigma_1} \right| = 2 \cdot$ Variationskoeffizienten. Abhilfe schaffte die Anwendung eines sog. Mittelungspixels, welcher vor dem Superpixel durch das Bild läuft und in ihm jeweils die Reflektanzen der Einzelpixel arithmetisch mittelt (*Schmidt, 2009*). Bei Satellitenbildern tritt ein weißes Rauschen in dieser Art und Weise jedoch nicht auf. Überdies birgt ein kontrastarmer Untergrund, dessen Bodenreflektanz ähnlich der des Aerosols ist, die Gefahr, dass das Aerosol vom Algorithmus nicht erkannt wird, da die entsprechenden Kontrastunterschiede nicht gegeben sind.

Im Ergebnis haben sich ein abwechslungsreicher Untergrund, dessen Kontrast durch Mie-Streuung an Aerosolpartikeln gemindert wird, sowie der grüne Spektralbereich für Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser bis $2,5 \mu\text{m}$ (PM_{2.5}) als optimal erwiesen.

3.2 Sensibilitätsstudien zum DTA-Algorithmus

Für die nun folgenden Tests wurden Satellitenbilder im grünen Kanal (Kanal 2; $0,53 - 0,61 \mu\text{m}$) des Landsat 5 Satelliten vom Großraum München und dem Gebiet des Fuciner Sees in Italien verwendet. Für München waren drei verschiedene Aufnahmezeitpunkte vorhanden: 16.April 2000, 01.April 2003 und der 17.April 2003 (*Harbusch, 2005*). Es wurde ein Superpixel der Größe 10×10 Einzelpixel verwendet. Die Belastungssituationen in München waren zu diesen Zeitpunkten nicht ideal (erforderlich wäre ein absolut unbelastetes Referenzbild und ein Belastungsbild). Sie waren vielmehr ein Kompromiss aus dem Wolkenbedeckungsgrad, der Verfügbarkeit von Satellitenbildern und der jeweiligen Feinstaubbelastungssituation. Die Landsat-Satelliten haben eine Wiederkehrdauer von etwa 16 Tagen, bis sie wieder die gleiche Szene aufnehmen. Bis zu einem Bedeckungsgrad von 10%, bzw. wenn die Wolken nicht die interessierenden Bereiche verdecken, ist eine AOT-Bestimmung noch möglich (*Schäfer et al., 2005*). Für das Gebiet des Fuciner Sees wurde anhand eines Satellitenbildes (01.Juli 1999) ein Atmosphärenkorrekturalgorithmus getestet und damit ein „künstliches“ Referenzbild erzeugt (*Arino et al., 1999*). Zunächst wurde jedoch der Luise-Kiesselbach-Platz in München anvisiert.



(a) Auffällige Veränderungen am 17.04.2003, die entweder auf eine Änderung der Bodenalbedo oder auf „Salz- und Pfefferpixel“ hindeuten
(b) AOT am 17.04. bzgl. des 01.04.2003 am Luise-Kiesselbach-Platz

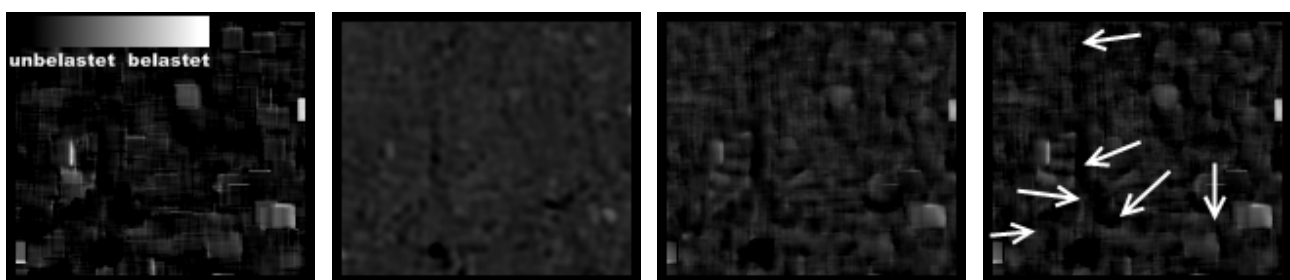
Abb. 2: Gegenüberstellung des Satellitenbilds vom 17.04.2003 mit entsprechendem AOT-Bild

Bei ihm handelt es sich um einen Hauptverkehrsknotenpunkt, an dem die Autobahn 95 nach Garmisch-Partenkirchen und mehrere Verkehrsadern Münchens münden. Davon ausgehend und anhand von Bodenmessungen sollte hier eine erhöhte Feinstaubbelastung vorzufinden sein.

Anhand von Bodenmessdaten und der visuellen Beurteilung der Bilder wurde der 01.04.2003 als Referenz- und der 17.04.2003 als Belastungssituation festgelegt. Vertauscht man das als unbelastet und das als belastet definierte Bild bei der DTA-Berechnung, ändert sich die AOT-Verteilung dahingehend, dass vorher stark belastete Gebiete (weiß gekennzeichnet) nun unbelastet (schwarz) wirken. Diese Vertauschung hat also auf die räumliche Lage von von AOT-Strukturen keinen Einfluss. Bild 2b ist das erste Ergebnis des reinen DTA-Codes (Gl. 6). Es kamen keine Zusatzalgorithmen wie beispielsweise der Mittelungspixel zum Einsatz. Wie man leicht sieht, kommt die Quadratstruktur des Superpixels sehr stark im AOT-Bild heraus. Des Weiteren fällt auf, dass es scheinbar recht starke punktuelle Feinstaubquellen in der Umgebung des Luise-Kiesselbach-Platzes gibt (vgl. Abb. 2b und weiße Kreise in Abb. 2a). Dieses Phänomen könnte einerseits ein Problem des Satellitensensors (sog. „Salz- und Pfeffereffekt“) sein oder auf eine Änderung der Bodenalbedo hindeuten. Der Salz- und Pfeffereffekt ist ein bekanntes Problem bei Satellitenbildern. Er lässt sich bei der im Voraus stattfindenden radiometrischen und geometrischen Korrektur der Bilder nicht beseitigen. Das Auftreten von „Salz- und Pfefferpixeln“ ist mit dem Auftreten von „heißen Pixeln“ bei handelsüblichen Digitalkameras vergleichbar. Nur die Ursache ist eine andere (*Sabins, 2000*). Eine Änderung der Bodenalbedo ist andererseits auch sehr wahrscheinlich. Es reicht aus, wenn zwischen den Aufnahmezeitpunkten eine Farbhalle mit hellem Blechdach neu gebaut oder ein Einfamilienhaus neu abgedeckt wurde. Nach Recherchen in „Google Earth“ (*Google Earth, 2008*) scheint es sich bei diesen Veränderungen um Neubauten von Lagerhallen mit weißem/grauem Blechdach bzw. um Baustellen allgemein zu handeln.

Ebenso fällt in Bild 2b auf, dass sich die quadratische Struktur des Superpixels auch im nahen Umfeld des Störpixels (vgl. Abb. 2b und 2a) weiter fortsetzt. Dies kommt zustande, da der Superpixel immer einen Pixel horizontal und vertikal weiter läuft und somit der Störpixel mehrmals in die Standardabweichungsberechnung mit einbezogen wird.

Um diesen Effekt zu minimieren, werden die einzelnen Pixel im Superpixel mit einer so genannten „Kernel function“ (Fensterfunktion) gewichtet. Als Fensterfunktion wird eine Gauß'sche Normalverteilungsfunktion (PDF=Propability Density Function) mit Wertebereich von -5 bis $+5$ und Mittelwert Null benutzt. Um die Gewichtung der einzelnen Pixel im Superpixel zu verändern, wird die Breite der Glockenkurve ($\hat{=} 2 \cdot \sigma$), entsprechend variiert. PDF3 bedeutet dann, dass es sich um eine Normalverteilung mit Wertebereich von -5 bis $+5$, Mittelwert Null und $\sigma = 3$ handelt.



(a) Ohne Gewichtung (b) Gewichtung mit PDF3 (c) Gewichtung mit PDF7 (d) Gewichtung mit PDF9

Abb. 3: Variation der Fensterbreite der Gewichtungsfunktion PDF

Das Resultat der Anwendung der PDF ist in den Bildern 3a bis 3d dargestellt. Die Fenstergröße wurde von $\sigma = 3$ bis $\sigma = 9$ variiert. Für $\sigma < 3$ würden zu wenige Pixel in die Berechnung der Standardabweichung im Superpixel eingehen und damit zu viel AOT-Information verloren gehen. Dagegen wird ab $\sigma > 9$ fast der volle Bereich des Superpixels genutzt und die PDF würde keine Pixel mehr heraus filtern. Schlussfolgernd kann man sagen, dass die Anwendung der PDF-Fensterfunktion zwar die Übersichtlichkeit der Struktur im Bild 2b verbessert, aber deren Interpretation in Bezug auf die AOT (Bodenalbedoänderung oder richtige AOT) nicht erleichtert hat. So könnte die schwarze Kurve in Abbildung 3 (mit weißen Pfeilen markiert) zum Beispiel den Verlauf einer Straße am Luise-Kiesselbach-Platz repräsentieren. Weil diese Straße im AOT-Bild schwarz erscheint, würde diese Annahme aber bedeuten, dass sie wiederum am 1. April 2003 stärker belastet war als am 17. April 2003. Harbusch (2005) hat aber bereits anhand von Bodenstationsmesswerten nachgewiesen, dass der 17. April 2003 stärker belastet gewesen war als der 01. April 2003. Weitere Interpretationsversuche gleichen damit eher Spekulationen (Schmidt, 2009).

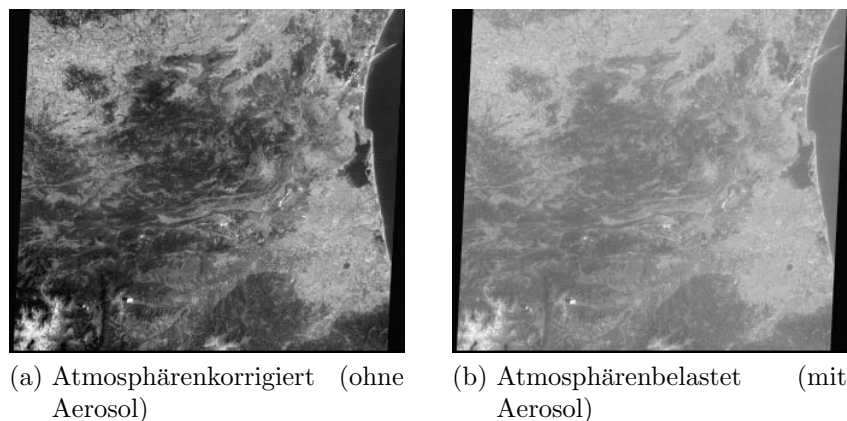


Abb. 4: Landsat 5 TM Aufnahme vom Gebiet des Fuciner Sees (Italien) am 01. Juli 1994 (Arino et al., 1999)

Die Untersuchung des Bildausschnitts der Landsat 5 Aufnahme des Fuciner Sees vom 01. Juli 1994 förderte bessere Ergebnisse zu Tage. Hier wurde ein von Arino et al. (1999) künstlich erzeugtes Referenzbild (atmosphärenkorrigiertes Satellitenbild) (Bild 4a) mit dem atmosphärenbelasteten Bild (Bild 4b) verglichen. Wie bei dem Bildausschnitt des Luise-Kiesselbach-Platzes in München wurde nun der DTA-Algorithmus einmal mit und einmal ohne Fensterfunktion (PDF) auf den Kanal 2 der Bilder 4a und 4b angewendet. Anhand der visuellen Einschätzung hat sich die PDF2-Variante als angemessen erwiesen.

Dieses Mal erzielte die Anwendung der PDF-Fensterfunktion gegenüber dem Gebrauch des reinen DTA-Algorithmus' auch einen Mehrgewinn an AOT-Information (siehe Bilder 5a und 5b) (feinere AOT-Strukturen).

Aber auch hier wird leider eine Schwachstelle des DTA-Algorithmus' deutlich. Die Aerosol optische Dicke (AOT) kann auch nur dort aus den Bildern gewonnen werden, wo auf Grund der Mie-Streuung an Aerosolpartikeln der Kontrast im Belastungsbild im Vergleich zum Referenzbild geschwächt wird.

Der Atmosphäreinfluss äußert sich im gesamten Bild 4b durch eine Art „Grauschleier“. Dieser „Grauschleier“ lässt sich anteilig der Rayleigh-Streuung und der Mie-Streuung zuordnen. Da Rayleigh-Streuung aber an Luftmolekülen stattfindet ($\propto \lambda^{-4}$), wird deshalb der blaue Kanal des Landsat-Bildes nicht genutzt. Über den hellgrauen Gebieten in Bild 4b ist fast gar keine

Kontrastreduzierung festzustellen, wohingegen über der Wasserfläche rechts im Bild und über den grünen Bereichen der Kontrastunterschied deutlich zum Tragen kommt und sich aus diesem Grund auch im AOT-Bild (Bild 5b) niederschlägt.

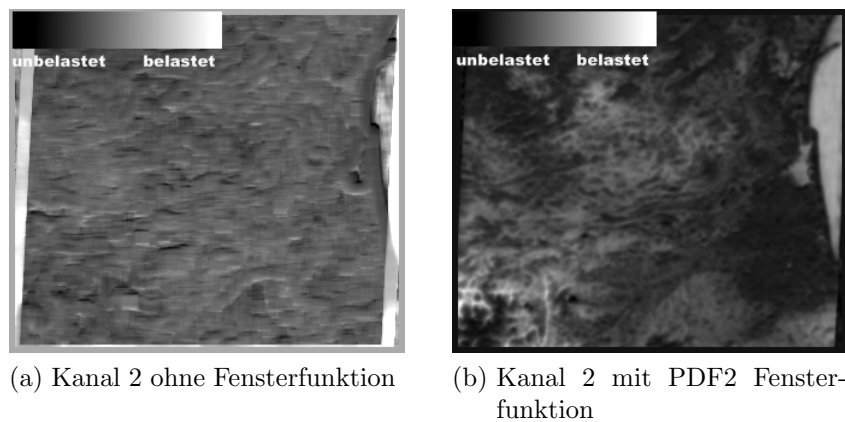


Abb. 5: AOT-Bild im Kanal 2 vom Gebiet des Fuciner Sees

4 Nachuntersuchung der Ergebnisse der Münchner ICAROS NET Studie mit dem eigenen MATLAB DTA-Code

4.1 Visueller Vergleich der AOT-Strukturen

Anhand der visuellen Einschätzung und des Vergleichs mit Bodenmessungen wurden zunächst der 16. April 2000 als Referenzbild und der 1. April 2003 sowie der 17. April 2003 als Belastungsbilder festgelegt (*Harbusch, 2005*).

Der visuelle Vergleich gewisser Strukturen in den entsprechenden AOT-Bildern, produziert mit der ICAROS NET Software und dem selbst programmierten MATLAB DTA-Code, ergab, dass der in MATLAB nachprogrammierte DTA-Algorithmus mit dem in der ICAROS NET Software verwendeten Programmcode übereinstimmt. Da die ICAROS NET Software einen 15×15 Superpixel verwendete und im MATLAB DTA-Code ein 10×10 Superpixel zur Anwendung kam, gab es kleinere Abweichungen.

4.2 Erweiterungen des DTA-Algorithmus

In der ICAROS NET Software kam Gleichung 6 bei der AOT-Berechnung zur Anwendung. Wie im Kapitel 2 beschrieben, birgt diese Gleichung aber gewisse Risiken. Deshalb wurden die folgenden AOT-Bilder 6a, 6b sowie 7 unter Zuhilfenahme von Gleichung 7 berechnet. Man erkennt anhand der AOT-Intensitäten (Grauabstufungen, je heller umso höhere AOT-Werte) die Straßenverläufe (z.B. Autobahnen) deutlich. Erhöhte Feinstaubkonzentrationen vergrößern die AOT und es findet über diesen Stellen eine vermehrte kontrastreduzierende Lichtstreuung statt, die vom DTA-Algorithmus detektiert wird.

Da die Satellitenbilder immer unter dem nahezu gleichen Sensoraufnahme- und Sonnenzenitwinkel aufgenommen und im Voraus der Verarbeitung einer radiometrischen Korrektur unterzogen wurden, ist es so gut wie auszuschließen, dass die AOT-Strukturen auf Grund der Winkelabhängigkeit der Bodenalbedo (je nach Einfallswinkel der Strahlung

verändert sich auch die Albedo des Untergrunds) entstanden.

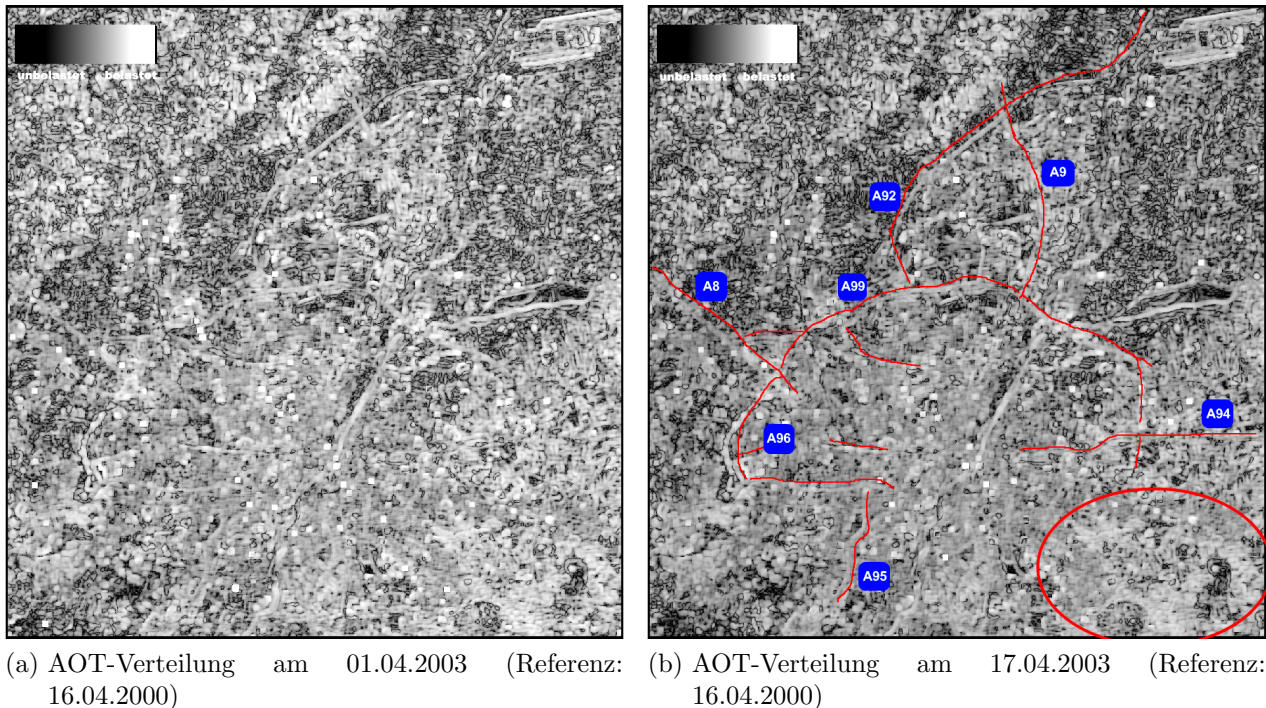


Abb. 6: AOT-Verteilungsmuster im Großraum München, Superpixelgröße: 10×10 und PDF9

Dessen ungeachtet kann es sein, dass zwischen den Satellitenbildaufnahmezeitpunkten der Fahrbahnbelag der Autobahnen erneuert oder gar die Autobahnen um zusätzliche Fahrspuren erweitert wurden. Diese Reflektanzunterschiede der verschiedenen Straßenbeläge kommen auch als scheinbare AOT zum Vorschein. Laut Aussage der Autobahndirektion Südbayern gab es zwischen den Jahren 2000 und 2003 keine baulichen Aktivitäten im betrachteten Raumbereich (*Autobahndirektion Südbayern, 2008*).

Die AOT-Verteilung in Bild 7 wurde mit dem Satellitenbild vom 01. April 2003 als Referenzbild und dem vom 17. April 2003 als Belastungsbild berechnet. Im Vergleich zu den Bildern 6a und 6b bemerkt man zunächst, dass kaum bzw. keine Straßen auszumachen sind. Auch die vorher sich deutlich abzeichnende Struktur des Flughafens ist kaum noch wahrnehmbar. Nur der Speichersee hebt sich auf Grund seiner sich ändernden Reflektanz (Algenblüten und Sedimentablagerungen) wieder hervor. Da die Aufnahmegeometrie (Sonnen- und Aufnahmezenitwinkel), wie bereits erwähnt, bei allen drei Landsat 5 TM Satellitenbildern gleich ist, scheidet eine Bodenalbedoänderung angesichts veränderter Einstrahlungswinkel aus. Jetzt bleibt nur noch der Rückschluss, dass der 01.04.2003 zwar weniger belastet ist als der 17.04.2003, aber die Belastungsunterschiede zwischen dem 16.04.2000 und den beiden 2003er Bildern doch um einiges größer sind. Diese These wird im Punkt 4.3 untermauert.

Weiterhin fallen vor allem in den Bildern 6a und 6b wieder die großflächig hohen AOT-Werte im Südosten auf Grund von Bodenalbedoänderungen (Landnutzungsänderungen) sowie die Salz- und Pfefferpixel (extrem helle Punkte) (auch in Bild 7) auf.

Im Übrigen kommt auch bei dem erweiterten DTA-Algorithmus die Problematik, dass das Referenzbild in Teilen stärker belastet ist als das Belastungsbild, in Form von negativen oder gar komplexen AOT-Werten zum Vorschein. Eine erste einfache programmiertechnische Abhilfe schafft die künstliche Erhöhung der Variationskoeffizientendifferenz im natürlichen

Logarithmus. Dieser ist nur für Werte > 0 definiert. Jene Prozedur dient aber nur der Vermeidung algorithmusbedingter Fehler bei der Visualisierung der AOT. Die Referenzbilder müssen im Voraus, sofern sie nicht belastungsfrei sind, um den Einfluss der Atmosphäre korrigiert werden. Strategien hierfür werden im nächsten Punkt gegeben.

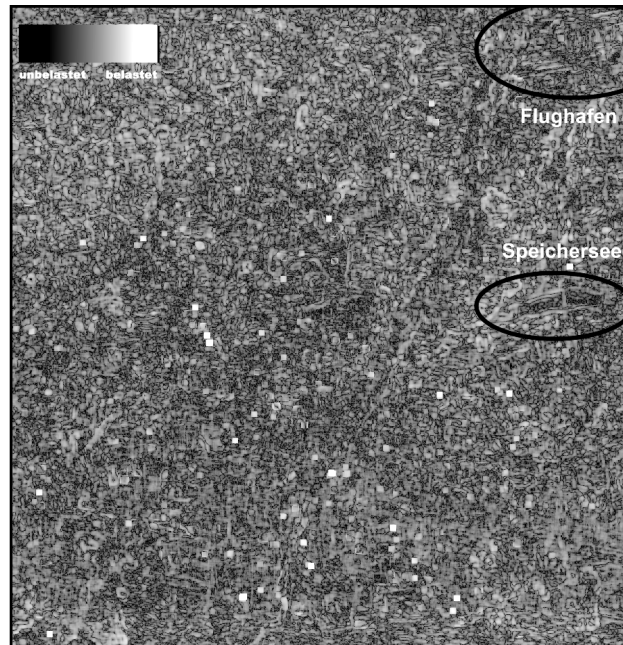


Abb. 7: AOT-Verteilung am 17.04.2003 (Referenz: 01.04.2000) im Großraum München, erstellt mit Gleichung 7 und PDF9

Ebenso sind in den Abbildungen 6a, 6b und 7 südöstlich von München (roter Kreis) auch Gebiete mit erhöhten AOT-Werten auszumachen. Diese sind wahrscheinlich durch Landnutzungsänderungen entstanden und haben nichts mit einer hohen bodennahen Feinstaubkonzentration zu tun. Mittels des Kanals 6 (thermisches Infrarot) von Landsat 5 TM lassen sich Bodenbedoänderungen detektieren. Diese Gebiete werden dann bei der AOT-Berechnung ausgeschlossen.

Des Weiteren müssen auch bei dem abgeänderten DTA-Algorithmus die berechneten relativen AOT-Werte an absolute AOT-Bodenmesswerte ankalibriert werden, um später allein aus den Satellitendaten absolute AOT-Werte ableiten zu können (*Schmidt, 2009*).

4.3 Korrekturverfahren für Referenzbilder

Bisher wurden die jeweiligen Satellitenbilder (Referenz- und Belastungsbilder) anhand der PM_{10} -Konzentrationen der Bodenstationen ausgewählt. Oft ist aber an Tagen mit geringer Belastung der Himmel wolkenverhangen, und man muss bei der Auswahl der Satellitenbilder mit Kompromissituationen (beispielsweise klarer Himmel, aber mittlere Belastung am Referenztag) leben. Durch einen solchen Kompromiss wird ein gewisser Anteil des Feinstaubs bei der AOT-Berechnung nicht erfasst (da hier Relativwerte bzgl. des Referenzbildes berechnet werden). Als Lösung des Problems schlagen wir zwei einfache Techniken vor, mit denen die Referenzbilder atmosphärenkorrigiert (Streuungseffekte der Aerosolpartikel heraus filtern) werden können.

Zuerst sei die Histogrammmethode erwähnt (*Sabins, 2000*).

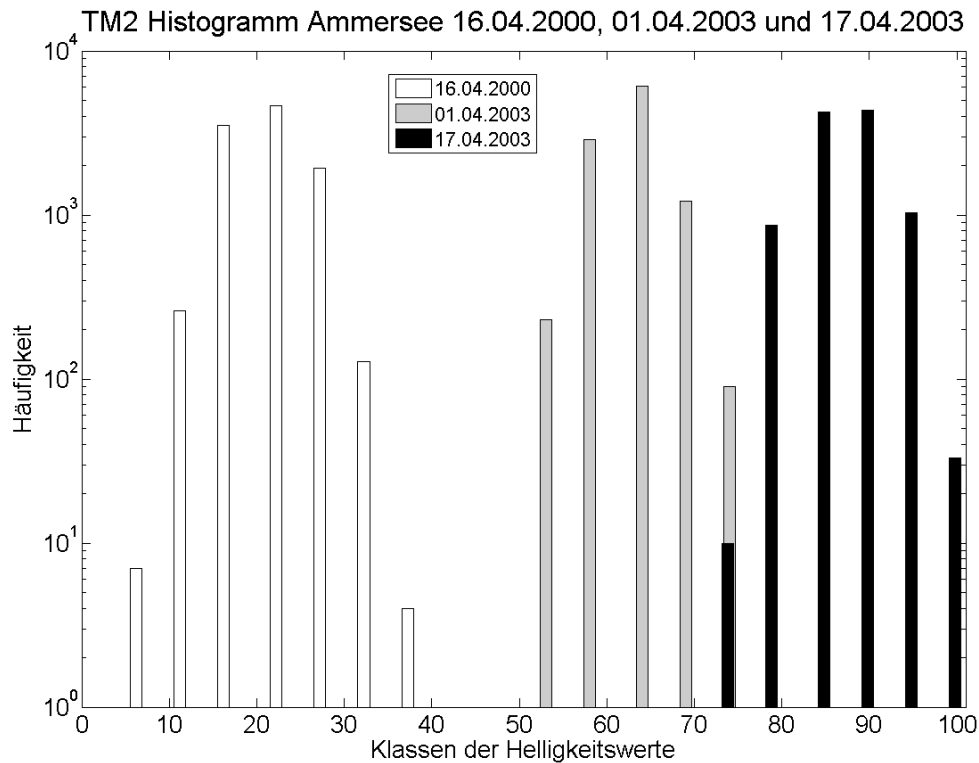


Abb. 8: Histogramme des Kanals 2 vom Ammersee am 16.04.2000 (weiß), am 01.04.2003 (grau) und am 17.04.2003 (schwarz), 100 äquidistante Klassen mit Breite drei

Im Normalfall bzw. auch von der ausgewählten Szene abhängig, sollte der volle Bildkontrastbereich eines 8-Bit-Sensors, d.h. Grau-/Helligkeitswerte von 0...255 vorhanden sein.

Über dunklen Flächen wie zum Beispiel dichten Nadelwäldern oder auch Seen müsste die Grau-/Helligkeitswerteverteilung infolge der geringen Albedo im visuellen Spektralbereich nahezu bei Null beginnen. Der Versatz von Null repräsentiert den Atmosphäreneinfluss. Kanal 1 (blauer Spektralbereich bei Landsat 5 TM) sollte nicht für die Atmosphärenkorrektur benutzt werden, da in ihm auch Rayleigh-Streuung an Luftmolekülen vorzufinden ist, es bei der Atmosphärenkorrektur für den DTA-Algorithmus aber nur um Streuung an Aerosolpartikeln geht. Den Versatzwert kann man nun einfach von den Grauwerten des Referenzbildes abziehen. Bild 8 zeigt die Histogramme der Reflektanzwerte im Kanal 2 (grüner Spektralbereich) von Landsat 5 TM des südwestlich von München gelegenen Ammersees. Deutlich zu erkennen ist die Verschiebung der Reflektanzverteilungen der 2003-Daten zu höheren Reflektanzwerten, ein Beweis für vorhandenen Feinstaub in der Luft.

Zur Korrektur des Referenzbildes vom 16.04.2000 um den evtl. vorhandenen Atmosphäreneinfluss, zieht man den kleinsten Werte der Reflektanzverteilung (hier weiß dargestellt) vom Referenzbild ab.

Ein weiteres Verfahren zur Ermittlung des Atmosphäreneinflusses vornehmlich in Satellitenbildern, die als Referenzaufnahmen genutzt werden sollen, ist die Regressionsmethode (*Sabins, 2000*). Hierzu werden in einem Streudiagramm der Kanal 2 auf die Ordinate gegen den Kanal 7 auf die Abszisse aufgetragen. Der Hintergrund dieses Verfahrens ist der gleiche wie bei dem Vergleich der Histogramme der Kanäle 7 und 2. Weil die Aerosolpartikel im kurzwelligen Infrarot (Kanal 7 von Landsat 5 TM, Wellenlängenbereich 2,08 – 2,35 μm) keinen streuenden

Einfluss ausüben, verläuft bei nahezu unbelasteter Atmosphäre die Regressionsgerade durch den Koordinatenursprung. Sind aber doch Staubteilchen vorhanden, verschiebt sich ihre Position im Streudiagramm. Mit einer linearen Regression erhält man den Schnittpunkt der Geraden der Streuellipse mit der Ordinate, also dem Kanal 2 und damit wieder den Einfluss der streuenden Partikel.

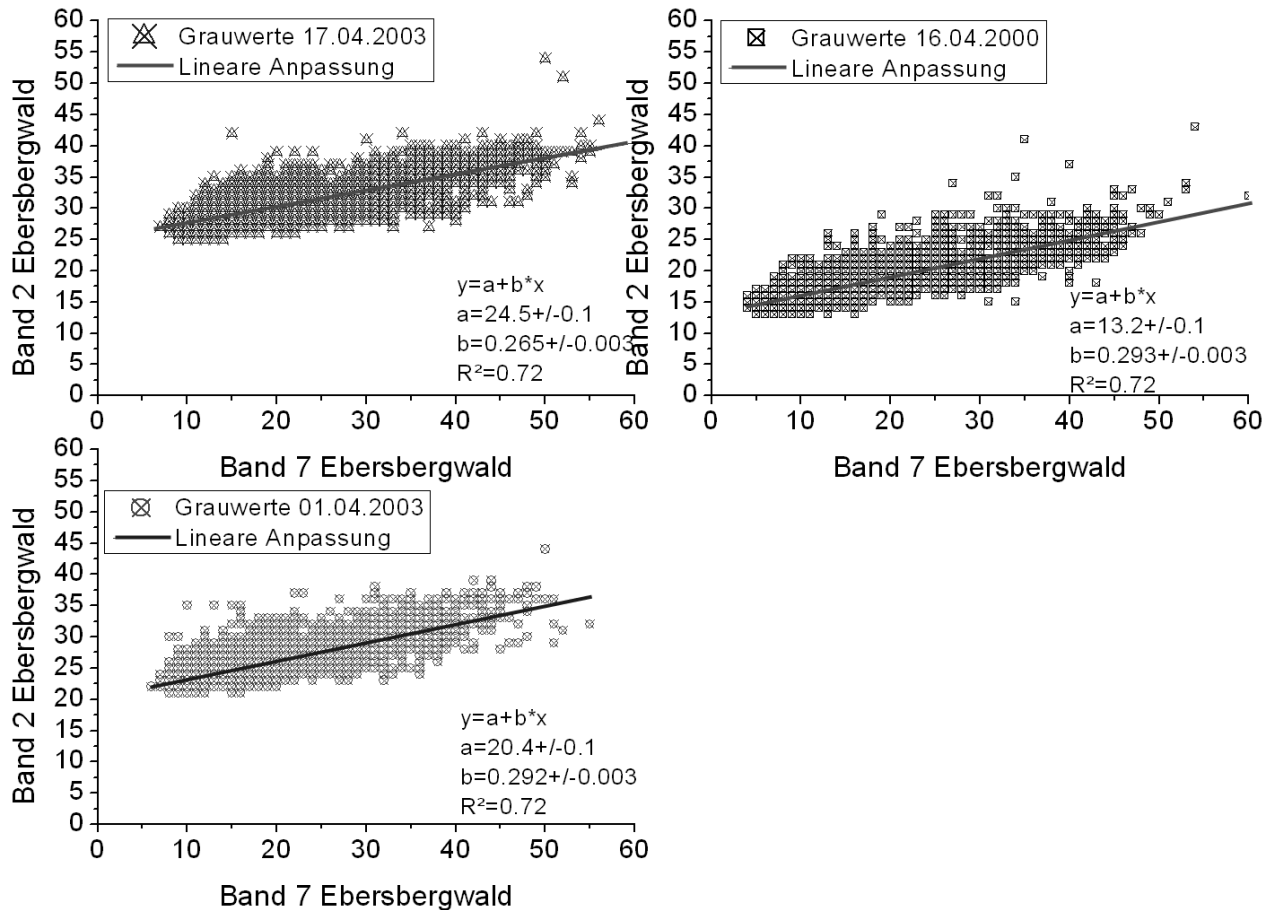


Abb. 9: Regressionsgeraden berechnet für einen Bildausschnitt (Ebersbergwald) der Kanäle 2 und 7 der Landsat 5 TM Satellitenbilder vom 16.04.2000, 01.04.2003 und 17.04.2003

Die Streudiagramme des Ebersbergwaldes geben in Bezug auf die Atmosphärenbelastung (Verschmutzung) den gleichen Trend wie die Histogramme des Ammersees (siehe Bild 8) wieder. Am 16.04.2000 ist ein durchschnittlicher Atmosphäreneinfluss (Streuung an Partikeln) von 13 Grauwerten, am 01.04.2003 von etwa 20 Grauwerten und am 17.04.2003 von 25 Grauwerten abzulesen (siehe Bild 9). Der Fehlerwert der Regressionen ist nie größer als $\pm 0,1$ Grauwerte. Damit bestätigt auch die Regressionsmethode, dass der 16.04.2000 von allen drei Satellitenbildern am wenigsten belastet war, gefolgt vom 01.04.2003 und dem am stärksten belasteten Satellitenbild vom 17.04.2003. Wie bei der Histogrammmethode zieht man zum Bereinigen des vorbelasteten Referenzbildes nun einfach den Versatzwert der Regressionsgeraden auf der y-Achse vom Bild ab.

5 Schlussbetrachtungen

Der DTA-Algorithmus ist ein einfaches Verfahren, um aus visuellen Satellitenbildern die Aerosol optische Dicke zu bestimmen. Im Gegensatz zu anderen Verfahren benötigt er kein Strahlungstransfermodell zur Informationsgewinnung. Er setzt, wie der Name schon sagt, lediglich voraus, dass zwischen der Referenzaufnahme und den Belastungsbildern entsprechende Kontrastunterschiede auftreten, aber die Bodenreflektanz ρ zeitlich unverändert bleibt. Ansonsten kann es vorkommen, dass die Kontrastunterschiede nicht nur infolge von Lichtstreuung an Aerosolpartikeln entstehen, sondern auch durch Änderungen der Bodenalbedo (z.B. hervorgerufen durch Landnutzungsänderungen). Beides wird vom DTA-Algorithmus zunächst als AOT erkannt. Um diese Unsicherheit einzuschränken, sollten die Referenz- und Belastungsaufnahmen nicht weiter als ca. 2 – 4 Wochen auseinander oder bei Jahresüberschreitungen in der gleichen Vegetationsperiode liegen.

Mittels eines thermischen Infrarot-Kanals gibt es auch die Möglichkeit, Bodenalbedoänderungen zu erkennen und die entsprechenden Pixel bei der AOT-Berechnung außer Acht zu lassen. Die Detektion besagter Bodenalbedoänderungen ist aber in dem verwendeten Algorithmus noch nicht ausgereift und bedarf weiterer zukünftiger Studien.

Ferner muss die räumliche Bodenauflösung des Satelliteninstruments in einem gewissen Bereich liegen, um die durch Lichtstreuung an Feinstaub verursachten Kontrastveränderungen gut detektieren zu können. So ist zum Beispiel die Bodenauflösung von MODIS (500 m in Nadir-Richtung) zu gering und die von Quickbird mit bis zu 2,5 m zu groß. Laut Sifakis et al. (1992) und Schäfer et al. (2005) wären bei einer räumlichen Auflösung von 500 m keine Kontrastunterschiede mehr erkennbar, bei einer räumlichen Auflösung von < 10 m die Gefahr zu groß, nur durch Bodenalbedoänderungen hervorgerufene Kontrastunterschiede zu detektieren. Damit bestätigt sich die Auswahl von Landsat 5 TM mit 30 m räumlicher Bodenauflösung. Um Details in Städten (z.B. Straßenzüge) genauer auflösen zu können, wäre SPOT mit 10 m Bodenauflösung natürlich besser geeignet, jedoch fehlt ihm besagter thermischer IR-Kanal. Dieser ist zwar für die AOT-Berechnung nicht essentiell, hilft aber, Fehl-AOT-Werte zu vermeiden.

Des Weiteren spielt auch die Größe des Superpixels beim DTA-Algorithmus eine wichtige Rolle. Wählt man dieses zu groß (größer 20×20 Einzelpixel), besteht die Gefahr der Glättung/Verschmierung des bestehenden Aerosolkonzentrationsgradienten. Bei einem zu kleinen Superpixel (kleiner als 10×10 Einzelpixel), kann es passieren, dass der Aerosolkonzentrationsgradient zu abgehackt und damit unwirklich im AOT-Bild erscheint. Die Festlegung der Größe des Superpixels ist aber häufig vom subjektiven Empfinden abhängig.

Die Ergebnisse von München erscheinen im Großen und Ganzen plausibel und nachvollziehbar. Ziel ist es letztendlich, in Ballungsräumen und größeren Städten flächendeckende und flächenaufgelöste Feinstaubkonzentrationen zu erhalten (*Schmidt, 2009*).

Danksagung

An dieser Stelle möchten wir uns bei Herrn Prof. Dr. Klaus Schäfer vom IMK-IFU in Garmisch-Partenkirchen, Dipl.-Geograf Andreas Harbusch sowie bei Dr. Ulrich Franck und Dr. Ellen Banzhaf vom Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung in Leipzig bedanken.

Adresse der Autoren

Institut für Meteorologie der Universität Leipzig
Stephanstraße 3, 04103 Leipzig

Literatur

- [Arino u. a. 1999] ARINO, O. ; VERMOTE, E. ; SPAVENTA, V.: Operational Atmospheric Correction of Landsat TM Imagery. In: *ESA Bulletin* 56 (1999), S. 32–35
- [Autobahndirektion 2008] AUTOBAHNDIREKTION: *Autobahndirektion Südbayern, persönliche Mitteilung von Christian Rehm zum Stand von Bauarbeiten am Münchner Autobahnring*. 2008
- [Bernstein u. a. 2008] BERNSTEIN, L. ; BOSCH, P. ; CANZIANI, O. ; CHEN, Z. ; CHRIST, R. ; DAVIDSON, O. ; HARE, W. ; HUQ, S. ; KAROLY, D. ; KATTSOV, V. ; KUNDZEWICZ, Z. ; LIU, J. ; LOHMANN, U. ; MANNING, M. ; MATSUNO, T. ; MENNE, B. ; METZ, B. ; MIRZA, M. ; NICHOLLS, N. ; NURSE, L. ; PACHAURI, R. ; PALUTIKOF, J. ; PARRY, M. ; QIN, D. ; RAVINDRANATH, N. ; REISINGER, A. ; REN, J. ; RIAHI, K. ; ROSENZWEIG, C. ; RUSTICUCCI, M. ; SCHNEIDER, S. ; SOKONA, Y. ; SOLOMON, S. ; STOTT, P. ; STOUFFER, R. ; SUGIYAMA, T. ; SWART, R. ; TIRPAK, D. ; VOGEL, C. ; YOHE, G.: *Climate Change 2007: Synthesis Report / Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. 2008. – Forschungsbericht
- [Chu u. a. 2003] CHU, D. A. ; KAUFMAN, Y. J. ; ZIBORDI, G. ; CHERN, J. D. ; MAO, J. ; LI, C. ; HOLBEN, B. N.: Global monitoring of air pollution over land from the Earth Observing System-Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). In: *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH* 108 (2003)
- [Deschamps u. Tanré 1981] DESCHAMPS, P.-Y. ; TANRÉ, D.: Influence de l'atmosphère en télédétection des ressources terrestres. In: *Signatures spectrales d'objets en télédétection* 5 (1981), S. 543–558
- [Google 2008] GOOGLE: *Google Earth Kartenausschnitt von München*. <http://maps.google.de/>, Dezember 2008
- [Harbusch 2005] HARBUSCH, A.: *Anwendung und Validierung eines Verfahrens der Satellitenbilddauswertung zur Bestimmung der Feinstaubbelastung in München und Umgebung*, Ludwig-Maximilian-Universität München, Diplomarbeit, 2005
- [Kaufman u. a. 2000] KAUFMAN, Y. J. ; HOLBEN, B. N. ; TANRÉ, D. ; SLUTSKER, I. ; SMIRNOV, A. ; ECK, T. F.: Will aerosol measurements from Terra and Aqua polar orbiting satellites represent the daily aerosol abundance and properties? In: *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS* 27 (2000), Nr. 23, S. 3861–3864
- [Kaufman u. a. 1997] KAUFMAN, Y. J. ; TANRÉ, D. ; REMER, L. A. ; VERMOTE, E. F. ; CHU, A. ; HOLBEN, B. N.: Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer. In: *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, 102 (1997), Nr. D14, S. 17051–17067
- [King u. a. 1992] KING, M. D. ; KAUFMAN, Y. J. ; MENZEL, W. P. ; TANRÉ, D.: Remote Sensing of Cloud, Aerosol, and Water Vapor Properties from the Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS). In: *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING* 30 (1992), Nr. 1
- [Sabins 2000] SABINS, F. F.: *Remote Sensing Principles and Interpretation*. W. H. Freeman and Company, 2000

- [Schäfer u. a. 2005] SCHÄFER, K. ; HARBUSCH, A. ; PEICU, G. ; EMEIS, S. ; HOFFMANN, H. ; JAHN, C.: Bestimmung der räumlichen Verteilung von Schwebstaubkonzentrationen mittels Satellitenbildern. In: *Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft* 65 (2005), Nr. 6, S. 247–250
- [Schmidt 2009] SCHMIDT, C.: *Anwendung und Validierung der Differentiellen Texturanalyse von Satellitenbildern zur Bestimmung der Aerosolbelastung*, Universität Leipzig, Institut für Meteorologie, Diplomarbeit, 2009
- [Sifakis u. Deschamps 1992] SIFAKIS, N. ; DESCHAMPS, P.-Y.: Mapping of Air Pollution Using SPOT Satellite Data. In: *PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING & REMOTE SENSING* 58 (1992), Nr. 10, S. 1433–1437
- [Tanré u. a. 1981] TANRÉ, D. ; HERMAN, M. ; DESCHAMPS, P.-Y.: Influence of the background contribution upon space measurements of ground reflectance. In: *APPLIED OPTICS* 20 (1981), Nr. 20, S. 3676–3683
- [Tanré u. Legrand 1991] TANRÉ, D. ; LEGRAND, M.: On the Satellite Retrieval of Saharan Dust Optical Thickness Over Land: Two Different Approaches. In: *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH* 96 (1991), Nr. D3, S. 5221–5227
- [Vermote u. a. 2006] VERMOTE, E. ; TANRÉ, D. ; DEUZÉ, J. L. ; HERMAN, M. ; MORCRETTE, J. J. ; KOTCHENOVA, S. Y.: Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum - Vector (6SV). In: *Manual Part 1 3* (2006), S. 1–55