



Ein Überblick über die Kombination spektraler und geometrischer Modellierung zur Anwendung in der forstlichen Fernerkundung

MICHAEL FÖRSTER, Berlin, DANIEL SPENGLER, Potsdam, HENNING BUDDENBAUM, JOACHIM HILL, Trier & BIRGIT KLEINSCHMIT, Berlin

Keywords: Geometrisch-optische Modelle, Strahlungstransfermodelle, Raytracing, Radiosity

Summary: *A review of the combination of spectral and geometric modelling for the application in forest remote sensing.* Focus of this paper is to give an overview of the motivation, design, and development of spectral and geometric models for application in forestry. Therefore, the main types of models, geometric-optical (GO), radiative transfer (RT), combination of GO and RT (GORT), and utilization of computer graphics, are introduced. A selection of the most influential models is named and shortly described. With RAMI (RADIATION transfer Model Intercomparison), an initiative to evaluate the results of the models is introduced. Additionally, models explicitly used in forestry are compared in respect to 3D simulation of vegetation and the distribution within the model.

Zusammenfassung: Ziel dieses Artikels ist es, einen Überblick über die Motivation, den Aufbau und die Entwicklung von spektralen und geometrischen Modellen für die Anwendung in der forstlichen Fernerkundung zu geben. Es werden die Hauptmodelltypen (geometrisch-optisch (GO), Strahlungstransfer (RT), Kopplung von GO und RT (GORT) und Ansätze mittels Computergraphik) vorgestellt. Weiterhin wird eine Auswahl der einflussreichsten Modelle benannt und kurz beschrieben. Mit RAMI (Vergleich von Strahlungstransfermodellen) wird eine Initiative zum Vergleich der verschiedenen Modelle vorgestellt. Zusätzlich werden die Modelle, welche explizit forstliche Anwendung haben noch bezüglich ihrer Verwendung von Pflanzenmodellen und deren Verteilung verglichen.

1 Einleitung

Das Hauptziel der Auswertung spektral hochauflösender optischer Fernerkundungsdaten ist es, ein grundlegendes Verständnis über die durch den Sensor gemessene Strahlung und deren Interaktion mit der Atmosphäre und der Oberfläche zu erlangen. Dieses Wissen kann dann zur Entwicklung von Algorithmen und operationellen Verfahren zur Auswertung des gemessenen Signals für verschiedene Anwendungen genutzt werden (PINTY & VERSTRAETE 1998). Um die Information in der gemessenen Strahlung genau und störungsfrei nachvollziehen zu können, werden Fernerkundungsdaten für verschiedene Anwendungen simuliert. Aus dieser Zielsetzung ergeben sich eine Rei-

he von Aufgabenstellungen der Modellierung (NILSON et al. 2003). Sie können dazu dienen:

- Verständnis vom reflektierten Signal zu erwerben. Welche Faktoren des spektralen Signals haben welchen Einfluss auf den gemessenen spektralen Wert?
- Simulation von Änderungen des Signals vorzunehmen, um Prognosen zu errechnen. Die Änderungen ergeben sich aus dem Jahresverlauf, Schädigungen (z. B. Trockenschäden) oder der Änderung der Landnutzung.
- quantitative Beziehungen zwischen terrestrisch kartierten Werten und Fernerkundungswerten abzuleiten (z. B. von Ernteträgern). Dies kann durch eine Modellinver-

sion dazu führen, dass spektrale Werte genutzt werden, um beispielsweise Informationen zum forstlichen Bestandesalter und zur Baumanzahl abzuleiten.

- die Qualität von Auswertungsalgorithmen unter kontrollierten Rahmenbedingungen zu prüfen, d. h. ohne wechselnde Beleuchtung, atmosphärische Bedingungen, radiometrische, spektrale und geometrische Auflösungen (VAN COILLIE et al. 2006).
- geplante Sensormissionen zu unterstützen.
- Auswertelgorithmen zu trainieren. Um eine Erkennung zu verbessern, werden häufig empirische Methoden (z. B. neuronale Netze) verwendet. Für komplexe Fragestellungen werden dafür meist große Mengen Trainingsdaten benötigt, die durch Modellierungen bereitgestellt werden können (HAGNER & OLOFSON 2004).

Die ersten Forschungsarbeiten mit modellierten Daten wurden bereits in den 1970er gemacht (SUITS 1972, TUCKER & GARRATT 1977). Dabei wurde zunächst das Ziel der Modellinversion am stärksten verfolgt, da die Sensoren auf längere Sicht noch nicht die gewünschte geometrische und spektrale Auflösung liefern konnten. Es sollten Modelle entwickelt werden, die die terrestrisch gemessenen Werte (Kartierung, Spektrometernmessungen) möglichst physikalisch basiert nachbilden können. Auf eine Fernerkundungsszene angewandt, sollten dann aus der generalisierten Information des Pixels quantifizierbare Werte (z. B. Baumanzahl, Blattflächenindex) durch zuverlässige numerische Algorithmen abgeleitet werden (Modellinversion).

Eine Vielzahl solcher Modellierungen wurden im Forschungsfeld der Fernerkundung für verschiedene Anwendungen durchgeführt und verglichen (WIDLÓWSKI et al. 2007). Dabei können fünf Typen von Signaturen innerhalb der Fernerkundung charakterisiert werden (LIANG & STRAHLER 1994):

- spektrale Information,
- räumliche Information auf der makroskopischen Ebene (Objekte sind wesentlich größer als die Wellenlänge),
- zeitliche Information (Änderung durch Jahreszeiten etc.),
- Winkelinformation,
- Polarisation.

Ein besonderer Bedarf, die charakterisierten Informationen modellbasiert zu erheben, entstand in der forstlichen Fernerkundung. Im Gegensatz zu anderen Vegetationsarten beinhalten empirische spektrometrische Messungen von Bäumen eine Vielzahl von technischen und praktischen Herausforderungen, die der Größe der Objekte und deren komplexen Aufbau geschuldet sind. Es gibt bisher nur wenige Untersuchungen, in denen Waldbäume als gesamtes Objekt von Leitern, Zeppelinen oder Klimatürmen aus spektral vermessen werden, um die grundlegenden Zusammenhänge zwischen spektraler Information und forstlichen Eigenschaften zu ermitteln. Durch solche empirisch erhobenen Daten können am genauesten die Einflüsse von Parametern wie Strahlungswinkel, Schattenwurf, Jahreszeit und Vergilbungserscheinungen sowie Degradationszustand und Alter der Bäume berücksichtigt werden (KOCH 1987). Leider werden aus Kostengründen auch in näherer Zukunft empirische Untersuchungen höchstens unterstützend zu Modellen Verwendung finden können. Deshalb soll dieser Artikel den bisherigen Forschungsstand aufbauend auf bestehenden Zusammenfassungen zur Modellierung von Vegetation (ATZBERGER 2003) und speziell für die Modellierung in forstlicher Anwendung vermitteln.

2 Arten physikalisch basierter Modelle

Für die Generierung von Reflektanzwerten in Modellen kann man zwischen vier grundlegenden Ansätzen unterscheiden, die oft kombiniert werden (GOEL 1988):

- Modellierung heterogener Vegetation einzelner Objekte, z. B. Bäume oder Bebauung (LI & STRAHLER 1985). Dabei wurden die makroskopischen Eigenschaften von Objekten einbezogen, ohne deren spektralen Eigenschaften korrekt widerzugeben (siehe Abb. 1 rechts) → **Geometrisch-Optische Modelle (GO)**.
- Modellierung von zumeist homogener Vegetation wie z. B. landwirtschaftliche Kulturen (VERHOEF 1984). Dabei wurde das gesamte Pflanze/Boden-System als Oberfläche mit bestimmten Streueigenschaften



Abb. 1: Beispiel für homogene (links) und heterogene (rechts) Vegetation (PINTY et al. 2001).

ten betrachtet, aber die spektralen Eigenschaften sehr detailliert einbezogen (siehe Abb. 1 links) → **Strahlungstransfermodelle** (RT).

- Kopplung von geometrisch-optischen Modellen und Strahlungstransfermodellen → **GORT-Modelle**.
- Verwendung von **computergraphischen Methoden** zur Modellierung von Vegetationsbeständen und deren Eigenschaften mittels **Ray Tracing** und **Radiosity** Modellen.

2.1 Geometrisch-optische Modelle (GO)

In der forstlichen Anwendung wurde versucht, die Struktur eines Bestandes durch einfache geometrische Figuren nachzubilden. Anhand kartierter Daten werden Kronenmodelle konzipiert, meist aus Kegeln oder Ellipsoiden bestehend, deren Parameter wie Höhe, Stammdurchmesser, Bestandesdichte oder Baumart variiert und verteilt werden (NILSON et al. 2003). Die Anzahl der Parameter wird oft erweitert um den Blattflächenindex (LAI), Bodenart sowie biophysikalische Parameter (Baumschichtung, Blattdicke). Die Komplexität dieser Modelle ist begrenzt, da sie anhand bestehender Daten erstellt und kalibriert werden. Auch die terrestrische Validierung der Modelle kann aus diesem Grund nur begrenzt durchgeführt werden.

Das erste für Baumkronen entwickelte Modell bestand zunächst aus Kegeln für einzelne Bäume (LI & STRAHLER 1985). Es gab innerhalb des Modells daher vier Objekte: beleuchteter Kegel (C), beschatteter Kegel (T), beleuchtete Bodenoberfläche (G) und beschattete Bodenoberfläche (Z). Es wird dabei ein Lambert'sches Reflexionsverhalten angenommen. Durch Monte-Carlo-Simulationen soll

evaluiert werden, wie viele Bäume innerhalb eines LANDSAT-Pixels (damals 80 x 80 m) stehen. Das zunächst undurchsichtige (opake) Baummodell wurde in einem nächsten Schritt abhängig von der Baumgröße mit einem Faktor für die Lichtdurchlässigkeit durch die Baumkrone ergänzt. Dabei wird das Licht, welches durch die Vegetationsschicht noch den Boden erreicht und nicht reflektiert oder absorbiert wird durch eine negativ exponentielle Funktion der Pfadlänge durch die Krone berechnet und so ein korrigierter Wert für den Teil der beschatteten Bodenoberfläche errechnet (LI & STRAHLER 1986).

In einem weiteren Schritt wurden die bisher verwendeten Ganzkörpermodelle mit kleineren Bestandteilen, z. B. Ästen und Blättern ergänzt, welche zunächst zufällig in die Grundgeometrie des Baumes verteilt wurden (STRAHLER & JUPP 1990). Auch die schematischen Grundkörper der Bäume als Vegetationselemente wurden variiert (Kugeln und Halbkugeln auf Zylinder, Ellipsoide, Kegel mit Zylinder). Geometrisch-optische Modelle wurden weiterhin verwendet, um unterschiedliche Baumgrößen und -abstände als strukturelle Variabilität in Versuchsreihen zu ermitteln. Darüber hinaus wurde, im Gegensatz zu den ersten Modellen mit einer zufälligen Verteilung der Bäume, nun deren Verteilung im Raum simuliert (COOPS & CULVENOR 2000). Abb. 2 (rechts) zeigt dabei die unterschiedlichen Möglichkeiten der Kombination von Modellwahl, Struktur der Vegetation und Verteilung der Bäume (CHEN & LEBLANC 1997). So kann allein ein Strahlungstransfermodell genutzt werden (1), ein geometrisch-optisches Modell mit zufälliger (2) oder nicht-zufälliger (3) Baumverteilung, welches durch die Einbeziehung von Aststrukturen (4) und der Modellierung des Strahlungstransfers von Einzelblättern (5) ergänzt werden kann.

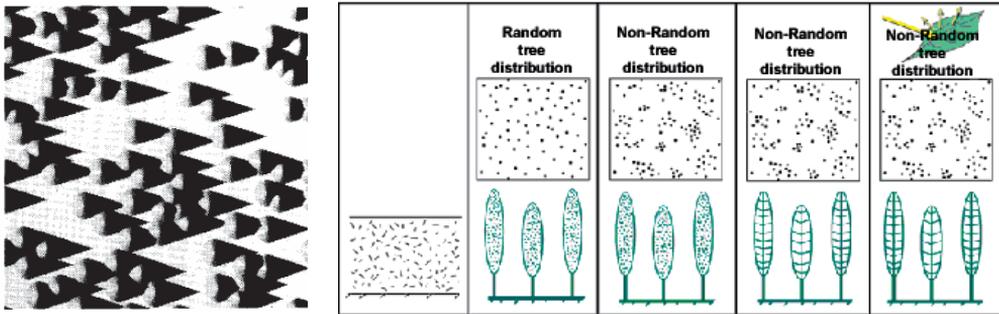


Abb. 2: Links: erstes simuliertes geometrisch-optisches Modell (Li & STRAHLER 1985) Rechts: 5-skalgiges geometrisch-optisches Modell (CHEN & LEBLANC 1997).

Das Grundproblem der geometrisch-optischen Ansätze blieb aber, dass die spektrale Signatur der Objekte hergeleitet werden musste, um diese auf die modellierten Objekte zu übertragen. Dies kann durch Feldmessung mit Spektrometern oder durch spektrale Analyse von zusätzlichen (meist hyperspektralen) flugzeuggestützten Bilddaten geschehen.

2.2 Strahlungstransfermodelle (RT)

Eines der bekanntesten Strahlungstransfermodelle (Radiative transfer (RT) models) ist das SAIL-Modell (VERHOEF 1984). Es war zunächst nicht räumlich explizit und nur für homogene Medien anzuwenden, da es konzeptionell von einer großen Anzahl unendlich kleiner, zufällig verteilten Vegetationskomponenten (z. B. Blättern) ausgeht. Im einfachsten Fall kann so ein Modell durch eine Photonen-transportgleichung (ähnlich des Photonen-transport in der Atmosphäre) mit bestimmten Randannahmen umgesetzt werden. Diese klassische und rein analytische RT-Theorie stößt aber speziell dann an Grenzen, wenn es sich um eine kleine Anzahl von relativ großen Objekten handelt, also eine stärkere 3-Dimensionalität implizit ist (SAICH et al. 2003). Seit Beginn der 90er Jahre wurden deshalb die Modelle in einzelne Komponenten für verschiedene Vegetationsbestandteile zerlegt (QIN & LIANG 2000).

Obwohl die Lösung der RT-Modelle für komplexe Vegetationsvorkommen bisher nicht realisiert wurde, sollten zumindest die Faktoren mit einbezogen werden, die den RT am

stärksten beeinflussen. Die RT-Modelle wurden schrittweise auf diskrete Objekte angewandt und dabei Spezifizierungen bezüglich der Bidirektionalen Reflektanzverteilungsfunktion (BRDF), etwa durch die Einbeziehung der Verteilung der Orientierung der Blätter (ROSS 1981) gemacht. Weiterhin erzeugen große Vegetationsobjekte (finite-size scatterer) einen Schatten, welcher wiederum ein Maximum der Reflektanz erzeugt, wenn Betrachtungswinkel und Illuminationswinkel identisch sind. Diesem Hot-Spot Effekt wird der größte Einfluss in den RT-Modellen zugeschrieben (QIN & GERSTL 2000). Auch das Auftreten von gegenseitiger Beschattung (mutual shadowing) zeigt, dass die Reflektanz durchaus von Form, Größe und Ausrichtung von einzelnen dreidimensionalen Objekten abhängt (BOLSTAD & LILLESAND 1992). In vielen Modellen wird diesen Einflüssen durch Korrekturfaktoren Rechnung getragen oder die Ansätze mit GO-Modellen oder computergraphischen Modellen kombiniert (oft auf verschiedenen Skalierungsebenen).

2.3 Kombination von geometrisch-optischen und Strahlungstransfermodellen (GORT)

Die Notwendigkeit der Integration des spektralen Signals führte zu der Kombination von geometrisch-optischen und RT Modellen (GORT). Bei diesen Modellen wurde berücksichtigt, dass speziell größere Vegetationselemente mindestens zwei Ebenen haben können.

Einerseits können strukturelle Komponenten des gesamten Objektes sehr gut von GO-Modellen abgebildet werden, andererseits sind einzelne Teile des Objektes (z. B. Blätter eines Baumes) eher mit RT-Modellen zu beschreiben (SAICH et al. 2003). Ein erster Ansatz der Kopplung wurde durch das Modell FLIM (forest-light interaction model) realisiert (ROSEMA et al. 1992). Eng an das RT-Modell SAIL gekoppelt wurden dort geometrische Komponenten wie die Anzahl der Bäume pro ha und Kronendurchmesser als Wahrscheinlichkeitsgrößen angenommen, die als Boden- oder Kronenreflektanz wieder ähnlich einer homogenen Oberfläche eines RT-Modell beschrieben wurden. In FLIM wurden die Effekte der gegenseitigen Beschattung der Objekte (multiple scattering) anfangs nicht berücksichtigt. Deshalb wurden verschiedene Ansätze entwickelt, bei denen aufbauend auf einem GO-Modell, die gegenseitige Beschattung mit einem RT-Modell gelöst wurde (LEWIS 1999).

Eine feinere Unterteilung der inneren Baumarchitektur (als GORT Modell) in Triebe und Äste wurde für Fichtenwald im Modell 4SCALE modelliert (CHEN & LEBLANC 1997). Dieses Modell wurde mit dem Modell LIBERTY (Leaf Incorporating Biochemistry Exhibiting Reflectance and Transmittance Yields), welches die biochemischen Parameter einzelner Blätter simuliert (DAWSON et al. 1998) noch zum Modell 5SCALE erweitert. In diesem Modell wird auch eine nicht-zufällige Verteilung (Neyman Distribution) der Bäume berücksichtigt, ohne konkrete Wachstumsmodelle der Arten zu verwenden. Ähnlich zu LIBERTY kann auch PROSPECT einzelne Blätter modellieren (FERET et al. 2008, JACQUEMOUD & BARET 1990). Dabei ist LIBERTY für Nadeln und PROSPECT für Laubblätter besser geeignet. In einer Vielzahl von Ansätzen konnte PROSPECT u.a. für die Modellierung einzelner Baumkronen der Rosskastanie verwendet werden (DAMM 2008).

Das Forstbestands-Reflexionsmodell FRT (Forest Reflectance and Transmittance) modelliert mehrstöckige Bestände und den Unterwuchs in einem GORT-Ansatz (KUUSK & NILSON 2000, KUUSK et al. 2008). Für die Blatt- oder Nadelreflexion können Prospect oder Liberty verwendet werden. FRT kann beispielsweise genutzt werden, um Blattflächenindizes

aus Spot-Daten abzuleiten (RAUTIAINEN 2005).

Eine weitere Kombination von geometrisch-optischen und Strahlungstransfermodellen ist in INFORM (Invertible Forest Reflectance Model) umgesetzt (ATZBERGER 2000). Dort werden mit FLIM (GO-Komponente), SAIL (RT-Komponente) und PROSPECT / LIBERTY (Variablen der Blattstruktur) sogar drei bereits existierende Ansätze gekoppelt. Die Inversion des Modells mit Hilfe eines künstlichen neuronalen Netzwerkes (Artificial Neural Network) und HyMap-Daten für verschiedene Parameter der Forststruktur (u.a. LAI, Kronendichte) konnte dabei nachgewiesen werden (SCHLERF & ATZBERGER 2006). Ähnliche Ansätze wurden auch für mediterrane Baumbestände (Oliven) getestet (ZARCO-TEJADA et al. 2004b).

Weitere geometrisch-optische Modelle arbeiten mit Voxeln unter Berücksichtigung des Strahlungsflusses (HAGNER & OLOFSON 2004, OLOFSSON & HAGNER 2006). Dies hat den Vorteil, dass der Strahlungsfluss für einzelne Objekte berechnet werden kann. Jedem Objekt wird so sein individuelles Strahlungsverhalten zugewiesen. Damit sind besonders bessere Ergebnisse zu erwarten, wenn es um die gegenseitig Beschattung von Objekten geht, die teilweise transmittieren. Auch hier ist die Geometrie der Bäume allerdings relativ einfach konzipiert (Ellipsoide auf Zylindern).

2.4 Verwendung der Computergraphik

Ab Mitte der 90er Jahre verschiebt sich der Fokus der Simulation von den RT-Modellen hin zur Lösung der Interaktion von einzelnen Objekten in Kombination mit Aussagen zum spektralen Verhalten (GOVAERTS & VERSTRAETE 1998). Um genauere Aussagen über den Strahlungstransfer innerhalb von komplexen mehrschichtigen Vegetationsobjekten zu bekommen, werden die bisherigen Lösungen um die explizite 3D-Modellierung aller Teilelemente der Vegetationskörper ergänzt. Die Berechnung ist zwar erheblich aufwändiger als bei herkömmlichen RT- und GO-Modellen, aber die Ergebnisse bilden auch den in der Realität gemessenen Wert wesentlich besser ab. Pro-

blematisch ist jedoch eine inverse Modellierung, die aufgrund der großen Anzahl zu spezifizierende Parameter oft nicht möglich ist. Eine Reihe solcher „simulierter Szenen“ wurden schon in verschiedenen Modellen getestet. Diese beruhen hauptsächlich auf den Methoden des Raytracing und der Radiosity-Berechnung.

Raytracing

Aus den Ansätzen zum Strahlungstransfer oder den geometrisch-optischen Modellen entstanden Mitte der 90er erste operationelle Methoden zur Simulation mittels Raytracing. Dabei werden Photonen (Rays) auf Objekte mit spezifischen radiometrischen Eigenschaften „geschossen“ und die Flugbahn (trajectory) des Photons ermittelt. Die Richtung und Energie eines gestreuten Photons hängt von den radiometrischen Verhalten (Absorption, Transmission, Reflexion) der Oberfläche am Punkt des Auftreffens ab. Dabei können sowohl Polygone als auch Volumenobjekte (Voxel) verwendet werden (SAICH et al. 2003). Voraussetzung für das Raytracing ist die Entwicklung von Pflanzenobjekten und deren Teilen (die unterschiedliche Detaillierung haben). Weiterhin werden zur Erstellung eines Raytracing-Modells Monte-Carlo (MC) Methoden eingesetzt, um den rechnerischen Aufwand einer „ray by ray“-Berechnung mit einer benötigten Genauigkeit zu einer konvergenten Lösung zusammenzufassen (DISNEY et al. 2000).

Das Modell Forest LIGHT (FLIGHT) lieferte erste komplexere Ansätze zur Verwendung von Raytracing/MC Methoden zur Simulation von Fernerkundungsszenen in Wäldern (GERARD & NORTH 1997, NORTH 1996). Dabei wird eine Makrostruktur aus einfachen geometrischen Objekten definiert (Kronen-Ellipsoide mit Stamm). Innerhalb der Kronenstruktur wird Blattwerk mit den strukturellen Parametern Dichte, Winkelverteilung, Blattgröße und spektraler Eigenschaft simuliert. Die Parameter sind in der Krone homogen, können aber von Krone zu Krone variieren.

Das Modell RAYTRAN nutzt nur geometrische Objekte, um diese mit MC/Forward Raytracing Methoden zu simulieren (GOVAERTS & VERSTRAETE 1998). Das Modell ist

daher nicht auf Baumkronen adaptiert und kann auf alle Pflanzenarten angewendet werden, sofern diese genau genug definiert und dargestellt werden. Dabei wird auf das L-System (ein grammatikalisches Modell zur Darstellung einfacher Zellorganismen vom Botaniker Lindenmayer) zur Pflanzengenerierung verwiesen (PRUSINKIEWICZ 1999).

Das Botanical Plant Modelling System (BPMS) nimmt die Idee der L-Systeme auf und implementiert diese in ein computergraphisches 3-D Pflanzenmodell (LEWIS 1999). Zunächst wird dafür die Pflanzengeometrie konstruiert. Dies geschieht durch eine Pflanzentopologie, eine Pflanzengeometrie, eine eventuelle Kronendefinition und Materialeigenschaften (also spektrale Eigenschaften – siehe Abb. 3). Das bestehende Modell wurde auch schon mit Pflanzenwuchsmodell TREE-GROWTH getestet (DISNEY et al. 2006). Das BPMS-Modell wurde anschließend mit einem 3-D Vegetationsmodell gekoppelt, welches meist aus photogrammetrisch oder terrestrisch vermessenen Pflanzen besteht, aber auch mit Wuchsregeln für Pflanzenarten erprobt wurde (getestet für Kiefer, Weizen, Hirse). Dabei werden auch Boden und Terraineigenschaften mit einbezogen. Das BPMS-Modell wird dann mit dem Reverse Raytracer DRAT (ADvanced Radiometric Ray Tracer) gekoppelt.

Die bisher vorgestellten Modelle beruhen auf Entwicklungen von einzelnen wissenschaftlichen Arbeitsgruppen. Mittlerweile werden zu Simulation auch freeware Raytracer wie Pov-Ray verwendet, die zwar nur Kro-



Abb. 3: Darstellung einer Kiefer in verschiedenen Alterstufen bei 850nm (DISNEY et al. 2006).

nenstrukturen wiedergeben und auch keine spektralen Merkmale der Vegetation aufgreifen, aber schnelle Ergebnisse von zur Analyse von Waldstrukturen oder Beschattungseffekten geben können (VAN COILLIE et al. 2006). Obwohl dieser Ansatz nicht in der Detailliertheit des BPMS/DRAT-Modells getestet wurde, ist dort der Anhaltspunkt zur Auswertung nicht nur von biophysikalischen Parametern sondern auch Pflanzenstrukturen von höchstauflösenden Daten gegeben.

Radiosity-Modelle

Im Kontrast zu den Raytracing-Modellen (wo verschieden Blick- und Illuminationbedingungen simuliert werden) wird bei Radiosity-Modellen alle emittierte oder reflektierte Energie der Oberflächen einer Szene für die Berechnung der Reflexion oder Absorption der anderen Oberflächenbestandteile herangezogen.

Bisher wurden zwei Modelle mit Radiosity-Ansätzen getestet. Das Modell RGM (Radiosity Graphics Method) koppelt dafür ein L-System-basiertes Pflanzenmodell, um Vegetation in einer semi-ariden Steppenlandschaft zu simulieren (QIN & GERSTL 2000) und aufbauend darauf auch für Mais (DONGHUI et al. 2005). Das Modell DART (Discrete Anisotropic Radiative Transfer) nutzt sowohl Raytracing als auch Radiosity-Ansätze (GASTELLU-ETCHEGORRY et al. 2003). In DART werden heterogene (also nicht nur aus einer Pflanzenart bestehende) Szenen als 3D-Matrix von Voxeln dargestellt. Dementsprechend wird auch Wald als Teil der Landschaft modelliert. Die Illumination und die Streuung zwischen den Voxeln ist weiter als Raytracing Ansatz simuliert aber innerhalb der Voxel wird ein Radiosity-Ansatz verwendet.

Modellierung virtueller Pflanzen

Die im vorangegangenen Absatz beschriebenen Methoden der Computersimulation zur Modellierung des Strahlungsverhaltens eines Pflanzenbestandes sind in höchstem Maße von den darin verwendeten Pflanzenmodellen abhängig. Es gibt eine Vielzahl verschiedener Ansätze, komplexe organische Strukturen zu modellieren, wobei man sich grundlegend an unterschiedlichen Abstraktionsebenen orien-

tieren kann. Es wird dabei von einzelnen Individuen ausgegangen, die sich zu Pflanzengesellschaften zusammenfügen. Je nach Abstraktionsniveau können entweder Einzelpflanzen modelliert werden, um geometrische Details in den Vordergrund zu rücken, oder statistische Ansätze Verwendung finden, die Eigenschaften wie z. B. die Abschattungsverhältnisse in den Hintergrund rücken (DEUSSEN & LINTERMANN 2005). Die vielfältigen Ansätze zur Modellierung organischer Strukturen, die sich in den letzten Jahrzehnten herausbildeten, können in regelbasierte und prozedurale Verfahren differenziert werden.

Die regelbasierten Verfahren nutzen eine formale Regelbasis, um einen definierten Ausgangszustand in einen Endzustand umzuwandeln. Die Regelsysteme wurden von Aristid Lindenmayer in den so genannten L-Systemen formalisiert. Diese beschreiben die Geometrie einer Pflanze durch Zeichenketten, bei denen durch die Anwendung von Ersetzungsregeln und darauf aufbauenden speziellen Verzweigungsmechanismen zeitabhängige und spezifisch zu erzeugende Geometrien definiert werden können, die auch das Wachstum eines Individuums beschreiben (KURTH 1994, PRUSINKIEWICZ & LINDENMAYER 2004). Die prozeduralen Verfahren nutzen im Gegensatz dazu parametrisierbare Algorithmen zur Generierung eines Pflanzenmodells. Ein Beispiel hierfür ist der sich an botanischen Wachstumsregeln orientierende Ansatz AMAP – botAnique et bioInforMatique de l'Architecture des Plantes (DE REFEYE et al. 1988), bei dem das Pflanzenwachstums in diskreten Zeitschritten von Knoten zu Knoten simuliert wird. Mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit verzweigen sich, ruhen oder sterben diese Knospen bei jedem Zeitschritt ab. Beide Methoden eignen sich, um virtuelle Pflanzenmodelle, deren Aussehen und Entwicklung simuliert werden kann, für die Einbindung in Strahlungstransfermodelle zu generieren.

Dem gegenüber steht die Modellierung von „statischen“ Pflanzenmodellen, ohne Integration von Wachstumsregeln, wie sie beispielsweise für die Visualisierung virtueller Landschaften Verwendung finden. Ein Programm, das in diesem Zusammenhang angewandt wird, ist Xfrog, mit dem auch einige der Pflanzenmodelle der im nächsten Kapitel beschrie-

benen RAMI-Testreihe generiert wurden. Diese Programme bieten die Möglichkeit optisch sehr ansprechende Pflanzemodelle hoher Komplexität zu erzeugen, deren botanische Korrektheit jedoch dabei nicht im Vordergrund steht. Das Wachstum eines Individuums kann nur durch Einzelsimulationen nachempfunden werden.

3 Vergleichende Betrachtung der vorgestellten Modelle

Da es wie beschrieben eine Vielzahl von Modellen zur Simulation von Fernerkundungsdaten gibt, wurde eine Initiative zum Vergleich der Ansätze gegründet (Radiation transfer Model Intercomparison = RAMI; rami-benchmark.jrc.it). Schon in der ersten Phase (1999) wurden 8 Modelle mit verschiedenen definierten virtuellen homogenen und heterogenen Szenen getestet (PINTY et al. 2001). Dabei sollen die Modelle den total spectral Bidirectional Reflectance Factor (BRF) ermitteln, welcher dann verglichen wird, um generelle Übereinstimmung oder Abweichung festzustellen. Die dafür verwendeten virtuellen Szenen haben eine Vielzahl von Spezifizierungen. Die zweite Phase (2002) beinhaltet zusätzlich ein drei-dimensionales Modell, welches eine komplex simulierte heterogene Szene eines Forstes mit einfachen Objektstrukturen und einer simulierten Topographie beinhaltet (PINTY et al. 2004). Spätestens an dieser Stelle treffen sich auch die Bemühungen der RT- und der GO-Modelle, da beide Komponenten für eine ausreichend genaue Modellierung von kom-

plexen Szenen benötigt werden. Die Spezifizierungen der 3D-Szenen wurden natürlich umfangreicher, damit ein reeller Test der RT-Modelle möglich wurde. Speziell für diese 3D-Szenen wurden verschiedene Modelle unter Verwendung von Monte-Carlo-Methoden, Radiosity und auch verschiedene GO-Modelle getestet.

Auch in der dritten RAMI-Phase (2005) wurden neue Szenarien entworfen (WIDLÓWSKI et al. 2007), unter anderem ein Birkenzenario (siehe Abb.4), um den strukturellen Realismus der Szenen zu erhöhen.

Generell ist anzumerken, dass durch die Tests innerhalb der RAMI-Initiative komplexe Modelle zum Einsatz kommen, deren Ziel der Vergleich der BRF-Werte ist. Die RAMI-Initiative ist aber nicht auf die forstliche Anwendung konzentriert, auch wenn die Beispiele darauf hindeuten könnten. Die strukturelle Qualität der einzelnen Modelle wird so nicht berücksichtigt. Die in diesem Text vorgestellten Ansätze, welche sich hingegen vornehmlich mit Simulation von Bäumen beschäftigen, sind fast vollständig in der RAMI-Initiative aktiv. In Tab. 1 sind die spezifisch forstlichen Ansätze entnommen, um einen weitergehenden Einblick in die Struktur der Simulationen dieser Anwendungen zu bekommen. Dabei wurde gesondert aufgeführt, ob einzelne Baumobjekte in welcher Detaillierung modelliert wurden, ob die Verteilung der Objekte (falls diese explizit modelliert wurden) einbezogen wurde und ob zusätzlich bestimmte (sich gegenseitig bedingende) Wuchscharakteristika berücksichtigt wurden.

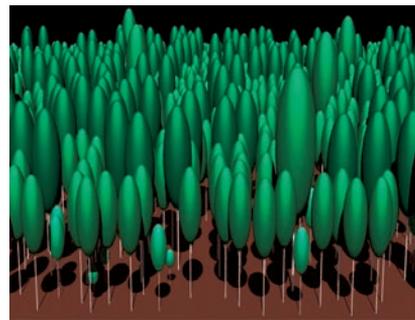
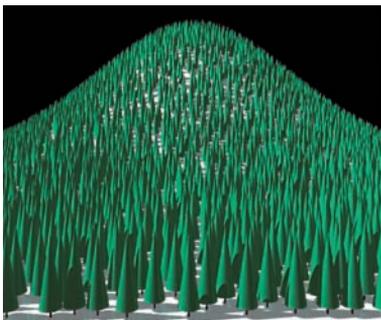


Abb. 4: Verwendete Testszenen für die RAMI-Initiative für RAMI-2 als Nadelwaldszene mit Topographie (links) und als „Birken“ (rechts), (PINTY et al. 2004, WIDLÓWSKI et al. 2007)

Tab. 1: Vergleich verschiedener physikalisch-basierter Forst-Modelle.

Modellname	Methode	Simulierte Objekte	Spektrale Auflösung [nm]	Geometrische Komplexität	Verteilung der Objekte/Wuchsmodelle
5SCALE	GORT	Fichtenwald	Full (400 – 2500)	Einfaches Kronenmodell (Zylinder mit Stamm) mit internen Strukturen (Triebe und Äste) und Reflexionsverhalten einzelner Blätter	Neyman Distribution
INFORM	GORT (fw, rev)	Norwegische Fichte	Full	Keine explizite räumliche Modellierung	k. A.
Hagner 04	GO + VOX	Wald (Art nicht spezifiziert)	k. A.	Einfaches Kronenmodell (Ellipsoid mit Stamm) mit einem Voxel-Ansatz	werden verteilt, aber Ansatz nicht erklärt
FRT	GO	Wald (Art nicht spezifiziert)	Full	Einfaches Kronenmodell (Zylinder mit Stamm) mit internen Strukturen (Triebe und Äste) und Reflexionsverhalten einzelner Blätter	k. A.
DART	RT (fw) + VOX	Grundsätzlich alle Objekte (von Objektdefinition abhängig)	Full	Von Größe der Voxel abhängig	k. A.
FLIGHT	MC / RT (fw, rev)	Wald (Art nicht spezifiziert)	Full	Einfaches Kronenmodell (Ellipsoid mit Stamm) mit intern definierten strukturellen Parametern	Poisson (unterschiedliche Baumabstände) Distribution
DRAT / BPMS	MC / RT (rev)	Kiefer, Schilf, Weizen (keine „Landschaften“)	Full	L-System mit vollständig ausmodellierten Pflanzen und Pflanzenteilen	TREE-GROWTH (für Kiefer)
RAYTRAN	MC / RT (fw)	k. A. (auf L-System wird verwiesen)	k. A.	Als „virtuelles Labor“ geplant – verschiedene Szenen können verwendet werden (Skalen vom einzelnen Blatt bis zur Landschaft)	k. A.

GO = geometrisch-optisch; VOX = Voxel; MC = Monte-Carlo; RT = Raytracing (fw = forward; rev = reverse), RA = Radiosity

4 Diskussion

Der in den vorangegangenen Kapiteln beschriebene Forschungsstand zeigt, dass speziell im Bereich der Simulation von biophysikalischen Parametern bereits mit hoch entwickelten computergraphischen und GORT-Modellen gearbeitet wird, die bis in sehr detaillierte Bereiche der Pflanzenphysiologie reichen (z. B. einzelne Blätter).

Zur Ableitung von Forstparametern mittels Modellinversion existieren zahlreiche Studien (ATZBERGER 2004, HEDLEY et al. 2009, ZARCO-TEJADA et al. 2004a). Ein Hauptproblem bei der Modellinversion ist, dass unterschiedliche Eingangsparameter (annähernd) identische Spektren ergeben können. Daher bildet die Inversion ein sogenanntes ill-posed problem. Dies kann durch Festsetzen einzelner Parameter mit Hilfe externer Information (z. B. aus Laserscanning) abgemildert werden.

Trotzdem ergeben sich aus den bisherigen Forschungen Defizite seitens der Fernerkundung, die vor allem mit der Verfügbarkeit von geometrisch höchstauflösenden Daten in Verbindung stehen. Die spektral und geometrisch sehr hoch aufgelösten Modelle speziell der Ansätze der Computergraphik haben meist nur eine Pflanzenart, die explizit modelliert wird. Daraus lässt sich ableiten, dass mit sehr guten (und physikalisch basierten) Raytracern gerade im Bereich von komplexen und biologisch nachprüfbaren Pflanzenverteilungen, wie sie beispielsweise im Modell SILVA (PRETZSCH et al. 2002) verwendet werden, noch Forschungsbedarf besteht. Dies beinhaltet speziell die Integration von Wuchsmodellen, welche bisher nur in einem Fall und für eine Pflanzenart implementiert wurde (DISNEY et al. 2006). Selbst eine Kombination der räumlichen Verteilung einer Pflanzenart in Kombination mit einem Wuchsmodell ist bisher noch nicht realisiert worden.

Bisher wurden vornehmlich winkelabhängige korrekte biophysikalische Parameter durch die Simulationen erzeugt (BRDF-Simulationen), um inverse Modellierungen möglich zu machen. Durch die Entwicklung geometrisch höchstauflösender Satellitensysteme ist die Herausforderung der Fernerkundung nun auch eine automatisierte Erkennung einzelner (Pflanzen)objekte und deren Interaktion. Sy-

stematische Klassifizierungen von simulierten Pflanzenverteilungen wurden bisher noch nicht durchgeführt. Wenn diese systematischen Klassifikationen mit Lernalgorithmen (z. B. Neuronale Netze) gekoppelt werden und dann auf reale Satellitenbildklassifikationen übertragen werden, können daraus wieder Rückschlüsse für die Verbesserung von Wuchsmodellen gezogen werden. Bisher wurde die simulierten Szenen fast nie zum trainieren von Auswertalgorithmen genutzt. Bei der Auswertung von Fernerkundungsszenen sind die Kriterien innerhalb eines Klassifikationsprozesses nicht klar voneinander unterscheidbar (spektrale Reflexion, Textur, Form von Vegetation überlagern sich z. B. mit dem Zustand einer Vegetationsform). Diese werden häufig an kleine Untersuchungsgebiete angepasst, um Umweltauswirkungen dort identifizieren zu können. Eine übertragbare Methode zur Auswertung anderer Bereichen (mit geringfügig unterschiedlicher naturräumlicher Ausstattung) ist damit häufig nicht gegeben. Abhilfe könnte diesem Mangel besonders durch eine genauere Analyse der einzelnen Parameter geschaffen werden. Da die real aufgenommenen Fernerkundungsdaten immer nur eine Mischung der Einflussgrößen darstellen, ist eine Simulation von Fernerkundungsdaten in Versuchsreihen hilfreich, um einzelne Indikatoren genauer zu bestimmen, die besonderen Einfluss auf die Umwelt besitzen.

References

- ATZBERGER, C., 2000: Development of an invertible forest reflectance model: The INFOR-Model. – 20th EARSeL Symposium, Dresden, 39–44.
- ATZBERGER, C., 2003: Möglichkeiten und Grenzen der fernerkundlichen Bestimmung biophysikalischer Vegetationsparameter mittels physikalisch basierter Reflexionsmodelle. – *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* **1**: 51–61.
- ATZBERGER, C., 2004: Object-based retrieval of biophysical canopy variables using artificial neural nets and radiative transfer models. – *Remote Sensing of Environment* **93**: 53–67.
- BOLSTAD, P. & LILLESAND, T.M., 1992: Rule-Based Classification Models: Flexible Integration of Satellite Imagery and Thematic Spatial Data. – *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **58**: 965–971.

- CHEN, J.M. & LEBLANC, S.G., 1997: A Four-Scale Bidirectional Reflectance Model Based on Canopy Architecture. – *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **35**: 1316–1337.
- COOPS, N. & CULVENOR, D., 2000: Utilizing Local Variance of Simulated High Spatial Resolution Imagery to Predict Spatial Pattern of Forest Stands. – *Remote Sensing of Environment* **71**: 248–260.
- DAMM, A., 2008: Hyperspektrale Fernerkundung zur Ableitung pflanzenphysiologischer Parameter von Stadtbäumen – Strahlungstransfermodellierung für Berliner Kastanienbestände. – Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät II. Humboldt Universität Berlin, 179 Seiten.
- DAWSON, T.P., CURRAN, P.J. & PLUMMER, S.E., 1998: LIBERTY—Modeling the Effects of Leaf Biochemical Concentration on Reflectance Spectra. – *Remote Sensing of Environment* **65**: 50–60.
- DE REFEYE, P., EDELYN, C., FRANCON, J., JÄGER, M. & PUECH, C., 1988: Plant Models Faithful to Botanical Structure and Development. – *Computer Graphics* **22**: 151–158.
- DEUSSEN, O. & LINTERMANN, B., 2005: Digital Design of Nature – Computer Generated Plants and Organics. – Springer, Berlin.
- DISNEY, M., LEWIS, P. & NORTH, P., 2000: Monte Carlo Ray Tracing in Optical Canopy Reflectance Modelling. – *Remote Sensing Reviews* **18**: 163–196.
- DISNEY, M., LEWIS, P. & SAICH, P., 2006: 3D modelling of forest canopy structure for remote sensing simulations in the optical and microwave domains. – *Remote Sensing of Environment* **100**: 114–132.
- DONGHUI, X., QIJIANG, Z. & JINDI, W., 2005: BRF of the scene of corn simulated by radiosity-graphic combined model. – *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **3**: 1882–1885.
- FERET, J.B., FRANCOIS, C., ASNER, G.P., GITELSON, A.A., MARTIN, R.E., BIDEL, L.P.R., USTIN, S.L., LE MAIRE, G. & JACQUEMOUD, S., 2008: PROSPECT-4 and 5: advances in the leaf optical properties model separating photosynthetic pigments. – *Remote Sensing of Environment* **112**: 3030–3043.
- GASTELLU-ETCHEGORRY, J.-P., GASCON, F., BELOT, A., LEFEVRE, M.J., BOYAT, P., GENTINE, P., ADER, G., DESCHARD, J., TORRUELLA, P. & CHOURAK, K., 2003: DART: 3-D model of optical satellite images and radiation budget. – *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **5**: 3242–3244.
- GERARD, F. & NORTH, P., 1997: Analyzing the Effect of Structural Variability and Canopy Gaps on Forest BRDF Using a Geometric-Optical Model. – *Remote Sensing of Environment* **62**: 46–62.
- GOEL, N., 1988: Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. – *Remote Sensing Reviews* **4**: 1–212.
- GOVAERTS, Y. & VERSTRAETE, M.M., 1998: Raytran: A Monte Carlo Ray-Tracing Model to Compute Light Scattering in Three-Dimensional Media. – *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **36**: 493–505.
- HAGNER, O. & OLOFSON, K., 2004: A high resolution geometric-optical forest model for development of single tree direction algorithms. – In: KLEINN, C., NIESCHULZE, J. & SLOBODA, B. (Eds.): GGRS, Göttingen: Sauerlaenders, 43–52.
- HEDLEY, J.C., ROELFSMA, C. & PHINN, S.R., 2009: Efficient radiative transfer model inversion for remote sensing applications. – *Remote Sensing of Environment* **113**: 2527–2532.
- JACQUEMOUD, S. & BARET, F., 1990: PROSPECT: A Model of Leaf Optical Properties Spectra. – *Remote Sensing of Environment* **34**: 75–91.
- KOCH, B., 1987: Untersuchungen zur Reflexion von Waldbäumen mit unterschiedlichen Schadsymptomen auf der Grundlage von Labor- und Geländemessungen. – Ludwig-Maximilians-Universität München.
- KURTH, W., 1994: Morphological models of plant growth: possibilities and ecological relevance. – *Ecological Modelling* **75–76**: 299–308.
- KUUSK, A. & NILSON, T., 2000: A Directional Multi-spectral Forest Reflectance Model. – *Remote Sensing of Environment* **72**: 244–252.
- KUUSK, A., NILSON, T., PAAS, M., LANG, M. & KUUSK, J., 2008: Validation of the forest radiative transfer model FRT. – *Remote Sensing of Environment* **112**: 51–58.
- LEWIS, P., 1999: Three-dimensional plant modelling for remote sensing simulation studies using the Botanical Plant Modelling System (BPMS). – *Agronomie, Agriculture and Environment* **19**: 185–210.
- LI, X. & STRAHLER, A., 1985: Geometric-Optical Modeling of a Conifer Forest Canopy. – *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **GE-23**: 705–721.
- LI, X. & STRAHLER, A., 1986: Geometric-Optical Bidirectional Reflectance Modeling of a Conifer Forest Canopy. – *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **GE-24**: 906–919.
- LIANG, S. & STRAHLER, A., 1994: Retrieval of surface BRDF from multiangle remotely sensed data. – *Remote Sensing of Environment* **50**: 18–30.
- NILSON, T., KUUSK, A., LANG, M. & LÜCK, T., 2003: Forest Reflectance Modeling: Theoretical Aspects and Applications. – *Ambio* **32**: 535–541.

- NORTH, P., 1996: Three-Dimensional Forest Light Interaction Model using a Monte Carlo Method. – *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **34**: 946–956.
- OLOFFSON, K. & HAGNER, O., 2006: Single Tree Detection in High Resolution Satellite Images and Digital Aerial Images using Artificial Neural Networks and a Geometric-Optical Forest Model. – *3D Remote Sensing in Forestry*, Vienna, 194–198.
- PINTY, B., GOBRON, N., WIDLÓWSKI, J.-L., GERSTL, S.A.W., VERSTRAETE, M.M., ANTUNES, M., BACOUR, C., GASCON, F., GASTELLU, J.-P., GOEL, N., JACQUEMOUD, S., NORTH, P., QIN, W. & THOMPSON, R., 2001: RADIATION Transfer Model Intercomparison (RAMI) Exercise. – *Journal of Geophysical Research* **106**: 11937–11956.
- PINTY, B. & VERSTRAETE, M.M., 1998: Modeling the Scattering of Light by Homogeneous Vegetation in Optical Remote Sensing. – *Journal of the Atmospheric Sciences* **55**: 137–150.
- PINTY, B., WIDLÓWSKI, J.-L., TABERNER, M., GOBRON, N., VERSTRAETE, M.M., DISNEY, M., GASCON, F., GASTELLU, J.-P., JIANG, L., KUUSK, A., LEWIS, P., LI, X., NI-MEISTER, W., NILSON, T., NORTH, P., QIN, W., SU, L., TANG, S., THOMPSON, R., VERHOEF, W., WANG, H., WANG, J., YAN, G. & ZANG, H., 2004: RADIATION transfer Model Intercomparison (RAMI) exercise: Results from the second phase. – *Journal of Geophysical Research* **109**: D06210.
- PRETZSCH, H., BIBER, P. & DURSKEY, J., 2002: The single tree-based stand simulator SILVA: construction, application and evaluation. – *Forest Ecology and Management* **162**: 3–21.
- PRUSINKIEWICZ, P., 1999: A look at the visual modeling of plants using L-systems. – *Agronomie* **19**: 211–224.
- PRUSINKIEWICZ, P. & LINDENMAYER, A., 2004: *The Alogirithmic Beauty of Plants*. – Springer, New York.
- QIN, W. & GERSTL, S.A.W., 2000: 3-D scene modeling of semi-desert vegetation cover and its radiation regime. – *Remote Sensing of Environment* **74**: 145–162.
- QIN, W. & LIANG, S., 2000: Plane-Parallel Canopy Radiation Transfer Modeling: Recent Advances and Future Directions. – *Remote Sensing Reviews* **18**: 281–305.
- RAUTIAINEN, M., 2005: Retrieval of leaf area index for a coniferous forest by inverting a forest reflectance model. – *Remote Sensing of Environment* **99**: 295–303.
- ROSEMA, A., VERHOEF, W., NOORBERGEN, H. & BORGESIU, J.J., 1992: A New Forest Light Interaction Model in Support of Forest Monitoring. – *Remote Sensing of Environment* **42**: 23–41.
- ROSS, J., 1981: *The Radiation Regime and Architecture of Plant Stands*. – W. Junk.
- SAICH, P., LEWIS, P., DISNEY, M., OEVELEN, P., WOODHOUSE, I., ANDRIEU, B., FOURNIER, C. & LJUTOVAC, 2003: Development of architectural vegetation growth models for remote sensing applications. – Final Report ESA.
- SCHLERF, M. & ATZBERGER, C., 2006: Inversion of a forest reflectance model to estimate structural canopy variables from hyperspectral remote sensing data. – *Remote Sensing of Environment* **100**: 282–294.
- STRAHLER, A. & JUPP, D., 1990: Modelling Bidirectional Reflectance of Forests and Woodlands using Boolean Model and Geometric Optics. – *Remote Sensing of Environment* **34**: 153–166.
- SUITS, G.H., 1972: The Calculation of the Directional Reflectance of Vegetative Canopy. – *Remote Sensing of Environment* **2**: 117–125.
- TUCKER, C.J. & GARRATT, M.W., 1977: Leaf Optical System Modeled as a Stochastic Process. – *Applied Optics* **16**: 635–642.
- VAN COILLIE, F., VERBEKE, L. & DE WULF, R., 2006: Semi-Automated Forest Stand Delineation Using Wavelet-Based Segmentation of Very High Resolution Optical Imagery in Flanders, Belgium. – In: LANG, S., BLASCHKE, T. & SCHÖPFER, E. (Eds.): *1st International Conference on Object-based Image Analysis*. Salzburg, Austria: ISPRS.
- VERHOEF, W., 1984: Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: The SAIL model. – *Remote Sensing of Environment* **16**: 125–141.
- WIDLÓWSKI, J.-L., TABERNER, M., PINTY, B., BRUNIQUEL-PINEL, V., DISNEY, M., FERNANDES, R., GASTELLU-ETCHEGORRY, J.-P., GOBRON, N., KUUSK, A., LAVERGNE, S., LEBLANC, S.G., LEWIS, P., MARTIN, E., MOTTUS, M., NORTH, P., QIN, W., ROBUSTELLI, M., ROCHDI, N., RUILOBA, R., SOLER, C., THOMPSON, R., VERHOEF, W., VERSTRAETE, M.M. & XIE, D., 2007: The third RADIATION transfer Model Intercomparison (RAMI) exercise: Documenting progress in canopy reflectance modeling. – *Journal of Geophysical Research*.
- ZARCO-TEJADA, P.J., MILLER, J.R., HARRON, J., HUB, B., NOLAND, T.L., GOEL, N., MOHAMMED, G.H. & SAMPSON, P., 2004A: Needle chlorophyll content estimation through model inversion using hyperspectral data from boreal conifer forest canopies. – *Remote Sensing of Environment* **89**: 189–199.
- ZARCO-TEJADA, P.J., MILLER, J.R., MORALES, A., BERJON, A. & AGÜERA, J., 2004B: Hyperspectral indices and model simulation for chlorophyll estimation in open-canopy tree crops. – *Remote Sensing of Environment* **90**: 463–476.

Anschriften der Autoren:

Dr.-Ing. MICHAEL FÖRSTER, Prof. Dr. BIRGIT KLEIN-SCHMIT, Technische Universität Berlin, Institut für Landschaftsarchitektur und Umweltplanung, D-10623 Berlin, Tel.: +49-30-314-72798, e-mail: michael.foerster@tu-berlin.de, birgit.kleinschmit@tu-berlin.de.

Dipl.-Geogr. DANIEL SPENGLER, Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Telegrafenberg, D-14473 Potsdam, Tel.: +49-331-288-1763, e-mail: daniel.spengler@gfz-potsdam.de.

Dipl.-Umweltwiss. HENNING BUDDENBAUM, Prof. Dr. JOACHIM HILL, Universität Trier, Fernerkundung – Remote Sensing Department, D-54286 Trier, Tel.: +49-651-201-4729, -4592, e-mail: buddenbaum@uni-trier.de, hillj@uni-trier.de.

Manuskript eingereicht: Februar 2010

Angenommen: April 2010