

Automatisierte Bestimmung der Bestockungsdichte in Nadelwäldern aus räumlich hochauflösenden Ortholuftbildern

CLEMENT ATZBERGER & MARTIN SCHLERF, Trier

Zusammenfassung: Die vorliegende Arbeit beschreibt die Entwicklung eines automatischen Tools zur flächendeckenden Bestimmung der Bestockungsdichte aus hochauflösenden Ortholuftbildern. In räumlich hochauflösenden digitalen Fernerkundungsdaten (10–100 cm) treten Baumkronen normalerweise als separierbare Objekte in Erscheinung. Dieser Umstand ermöglicht eine automatische Identifikation individueller Baumkronen. Das vorgestellte Verfahren basiert auf einer Binarisierung von SW-Orthophotos mit nachgeschalteten morphologischen Operationen und einer darauf aufbauenden Objekterkennung in einem 25 m × 25 m großen gleitenden Fenster. Die Methode erlaubt eine Bestimmung von Bestockungsdichten in Nadelwäldern mit einer Genauigkeit von etwa ± 65 Bäumen pro Hektar bei Bestockungsdichten zwischen 200 und 800 Bäumen pro Hektar. Information zur Bestockungsdichte können u. a. zur Bestandsabgrenzung verwendet werden, als *a priori* Information bei der Inversion physikalisch basierter Reflexionsmodelle sowie zur Initialisierung und Parametrisierung von Stoff- und Energieflussmodellen.

Summary: *Automatic stem density estimation in coniferous forests from high spatial resolution orthophotos.* In remotely sensed aerial images or digital orthophotos of high spatial resolution (10–100 cm) tree crowns are typically visible as almost distinct objects. One important structural forest parameter, stem density, can be derived through identification of individual tree crowns. A tool has been developed to automatically determine stem densities in coniferous forests from digital black-white orthophotos. The procedure is based on thresholding of orthophotos followed by morphological operations and object identification using a moving window. The method is capable of estimating stem density with an accuracy of approximately ± 65 trees per hectare for stem densities varying between 200 and 800 stems per hectare. On the basis of the retrieved stem densities, regrouping of stands can be organized to follow criteria other than those currently followed by forest inventories, particularly when considering the relationship between average stand density and stand age. Moreover, estimated stem densities are useful in the inversion of physically based forest reflectance models and for initialization and parameterization of biogeochemical process models.

1 Einleitung

In einer auf Nachhaltigkeit bedachten Forstwirtschaft sind u. a. flächengenaue Angaben über Bestockungsdichten erforderlich (SAUERBORN et al. 1998). Während diese Informationen den staatlichen Forstverwaltungen für Kommunal- und Staatsforsten zumindest teilweise vorliegen, besteht ein erhebliches Informationsdefizit bezüglich der Privatwälder. Angaben zur Bestockungsdichte sind darüber hinaus hilfreich bei der Inversion physikalisch basierter Forstre-

flexionsmodelle (CHEN & LEBLANC 1997, ATZBERGER 2000 a, b) sowie bei der Parametrisierung und Initialisierung biogeochemischer Stoff- und Energieflussmodelle (KOROL et al. 1996).

Die flächendeckende und zeitnahe Ableitung der Bestockungsdichte ist unter einem vertretbaren Arbeitsaufwand nur unter Zuhilfenahme von Fernerkundungssensoren möglich; in diesem Zusammenhang erscheinen Ortholuftbilder als besonders geeignet. Sie besitzen eine so hohe räumliche Auflösung, dass in den meisten Fällen eine Un-

terscheidung einzelner Baumkronen möglich ist. Orthophotos sind zudem frei von Verzerrungen auf Grund von Maßstabs- und Reliefunterschieden.

Die manuelle Auszählung der im Luftbild erfassten Baumkronen ist zwar im Prinzip möglich (AKCA et al. 1984), scheidet aber wegen des hohen Zeitaufwands bei größeren Beständen aus. Auch wurden bereits auf unterschiedlichen Ansätzen beruhende Methoden zur automatischen Erkennung und Abgrenzung von Baumkronen aus hochauflösenden digitalen Bilddaten entwickelt, z. B. von GOUGEON (1995), POLLOCK (1998) und LARSEN (1997). Eine Zusammenstellung verschiedener Ansätze befindet sich in HARALIK & SHAPIRO (1985) und PAL & PAL (1993). Die meisten dieser methodisch anspruchsvollen Verfahren sind in der Lage, Baumposition und Kronenausmaße verhältnismäßig genau zu bestimmen. Dies ist jedoch für die Ableitung der Bestockungsdichte nicht unbedingt notwendig; vielmehr ist es für die gedachten Anwendungen ausreichend, die Baumkronen zu separieren und die Gesamtzahl der in einem Bildausschnitt vorkommender Bäume zu ermitteln.

Bei automatischen Verfahren ist zu berücksichtigen, dass benachbarte Luftbilder innerhalb eines Befliegungsstreifens oftmals eine hohe Variabilität bezüglich ihrer Helligkeits- und Kontrasteigenschaften aufweisen. Unterschiede resultieren u. a. aus variablen Beleuchtungsintensitäten, Mitlicht-/Gegenlichteffekten und nachfolgenden Digitalisierungsschritten. In Orthophotomosaiken, die aus vielen Einzelbildern zusammengesetzt sind, ergeben sich daher auch für ähnliche Waldflächen große Unterschiede in der Grauwertverteilung. Dies erschwert in einem nicht unerheblichen Maße die gewünschte Festlegung eines Schwellwertes, mit dessen Hilfe Baumkronen und Untergrund automatisch voneinander getrennt werden könnten.

Der nahe liegende Ansatz, den jeweiligen Grenzwert direkt aus dem Histogramm abzuleiten gelingt gut bei bimodalen Grauwertverteilungen (s. a. Abb. 2A). Viele Bildausschnitte weisen jedoch indifferente Grauwertverteilungen auf, so dass diese Vorge-

hensweise nicht immer möglich ist (s. a. Abb. 2B). In der vorliegenden Arbeit wurde daher eine automatische Methode entwickelt, welche die einzelnen Baumkronen mittels eines dynamischen Schwellwertes separiert und schließlich die Bestockungsdichte errechnet.

2 Untersuchungsgebiet und Datengrundlage

Das Untersuchungsgebiet umfasst den im westlichen Hunsrück gelegenen Idarwald (49°40'N, 7°10'E) (Abb. 1). Der Höhenzug des Idarwaldes, morphologisch durch einen NE-SW streichenden Härtlingerrücken gekennzeichnet, ist aus unterdevonischem Taunusquarzit aufgebaut. Auf den nährstoffarmen, zum Teil stark versauerten Böden (Ranker, Podsole, podsolige Braunerden) bilden artenarme Buchenwälder (*Luzulo-Fagetum typicum*) die natürlichen Waldgesellschaften. Ende des 18. Jahrhunderts wurde die natürlicherweise nicht vorkommende Fichte (*Picea abies*) eingeführt, die seitdem eine ständige Ausdehnung erfahren hat und heute den größten Flächenanteil einnimmt (Arbeitskreis Standortkartierung 1985).

Panchromatische Ortholuftbilder wurden digital als georeferenzierte Rasterdaten vom Landesvermessungsamt Rheinland-Pfalz für die Fläche des Untersuchungsgebietes Idarwald zur Verfügung gestellt. Die Bilddaten sind aus analogen Orthophotos im Maßstab 1:5000 abgeleitet, haben eine Bodenauflösung von 0,25 m × 0,25 m und liegen als quadratische Kacheln mit einer Seitenlänge von 2 km vor.

Da sich die vorliegende Untersuchung lediglich auf Nadelwaldbestände bezieht, wurden Nicht-Nadelwaldgebiete ausmaskiert. Die Nadelwaldmaske ist zuvor mittels einer unüberwachten Landnutzungsklassifikation aus hyperspektralen Fernerkundungsdaten (HyMAP) abgeleitet worden (SCHLERF et al. 2002). Alle nachfolgenden Analyseschritte beziehen sich lediglich auf diesen maskierten Ausschnitt des gesamten Orthophotomosaiks.

Im Untersuchungsraum wurden insgesamt 40 Fichtenbestände als Referenz-

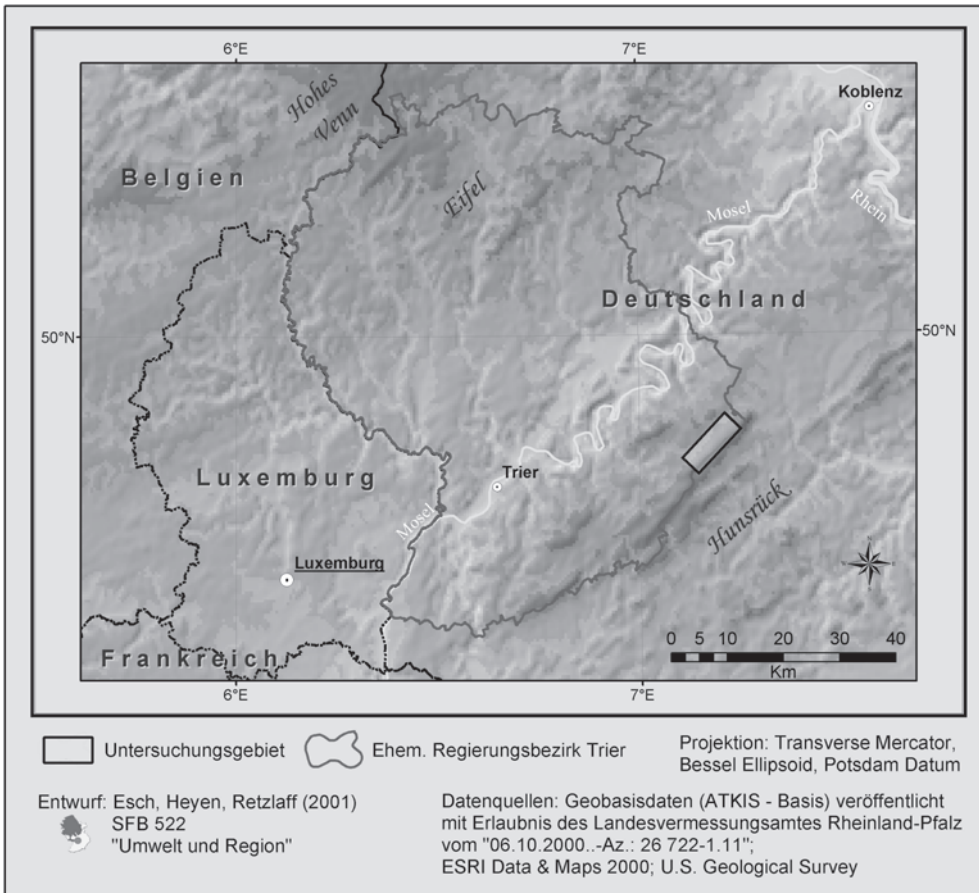


Abb. 1: Lage des Untersuchungsgebietes Idarwald.

flächen ausgewählt. An ihnen wurden Kalibrierung und Verifikation des Algorithmus vollzogen. Für jeden Bestand wurde ein repräsentatives Teilbild aus den Orthophotodaten extrahiert. Die Größe der verschiedenen Teilflächen schwankt zwischen 0,10 und 0,25 ha. Durch manuelle Auszählung konnten die Stammzahlen bestimmt und daraus die entsprechenden Bestockungsdichten berechnet werden; ihre Dichte schwankt zwischen rund 200 und 800 Bäumen pro ha. Zur Überprüfung dieser Zählergebnisse wurden zusätzlich Bestockungsdichten für repräsentative Teilflächen von 30 m × 30 m im Gelände erhoben (hier nicht weiter verwendet).

3 Methodenbeschreibung

3.1 Übersicht

Der in MATLAB (The Mathworks 2000) programmierte Algorithmus macht sich den Helligkeitsunterschied zwischen Baumkronen und Untergrund zu Nutze, um einzelne Bäume mittels Schwellwert (SW) zu identifizieren. Aus bereits oben genannten Gründen existiert jedoch kein allgemein gültiger Grenzwert; vielmehr gibt es für jeden Bildbereich einen optimalen Wert, mit dem eine bestmögliche Trennung von Baumkronen und Untergrund erzielt werden kann. Wird der Wert zu hoch gesetzt, werden relativ dunkle bzw. kleine Baumkronen nicht er-

kannt. Bei einem zu geringen Grenzwert können Bildpixel, die Hintergrund darstellen, fälschlicherweise als Krone interpretiert werden, wodurch mehrere Einzelkronen zu einer großen Baumkrone zusammengefasst würden. Daher wird vorgeschlagen, den Schwellwert indirekt aus bildstatistischen Parametern abzuleiten (z. B. Standardabweichung), wobei jeweils nur ein 100×100 Pixel großes Fenster des Gesamtbildes betrachtet wird (entspricht $25 \text{ m} \times 25 \text{ m}$). Dieses bewegt sich im Verlauf der Analyse schrittweise weiter (Schrittweite: 5 m).

Im Anschluss an die Binarisierung erfolgt in einem weiteren Bildbearbeitungsschritt ein so genanntes Opening. Opening bezeichnet eine Erosion gefolgt von einer Dilatation. Im Erosionsschritt werden weiße Bildpixel am äußeren Rand einer Baumkrone entfernt, um zusammenhängende Objekte aufzutrennen. Gleichzeitig werden zu kleine Objekte, die in der Realität keine Baumkronen repräsentieren, eliminiert. Im anschließenden Dilatationschritt erfolgt eine Zusammenführung räumlich sehr nahe beieinander liegender Objekte, indem weiße Bildpixel hinzugefügt werden (PRATT 1991).

Zur Bestimmung der Gesamtzahl an Objekten in einem Bildausschnitt werden die Objekte automatisch mit Labels versehen, nummeriert und gezählt (HARALICK & SHAPIRO 1992), wobei die Objektgröße unberücksichtigt bleibt. Die im aktuellen Bildausschnitt ermittelte Bestockungsdichte wird letztendlich an die Position des Zentralpixels in das Ausgabebild zurückgeschrieben. Bestandsweise aggregiert, lassen sich aus diesen pixelbezogenen Bestockungsdichten bestandsweise Merkmale berechnen (z. B. Mittelwert, Varianz).

3.2 Bildstatistikbezogene Schwellwertfestsetzung und Modellkalibration

Zentraler Punkt des vorgestellten Ansatzes ist die Ermittlung einer bestmöglichen Beziehung zwischen Schwellwert und Bildstatistik (hier Standardabweichung der Grauwerte im gleitenden Fenster)

$$SW = a^I + a^S \cdot SD \quad (\text{Eq.1})$$

mit SW: Schwellwert zur Binarisierung der Grauwerte

SD: Standardabweichung der Grauwerte

a^I , a^S : Interzept und Steigung der linearen Beziehung zwischen Schwellwert und Standardabweichung

Um für jedes einzelne Referenzbild den Grenzwert zu ermitteln, der unter Einbeziehung der nachfolgenden morphologischen Operation zu optimalen Schätzergebnissen führt, wurden alle Bilder über den gesamten Wertebereich in $1/100$ Schritten binarisiert, den oben genannten morphologischen Operationen unterworfen und die schwellwertabhängigen Bestockungsdichten ermittelt. Nach Anpassung einer Polynomfunktion zwischen Schwellwert und geschätzten Bestockungsdichten kann dann der optimale Schwellwert für jedes Referenzbild ermittelt werden (Abb. 2C, D). Dabei können prinzipiell zwei Fälle auftreten: Im ersten Fall ist die Differenz zwischen Schätz- und Referenzwert für nur einen Grenzwert minimal. Im zweiten Fall gibt es zwei „optimale“ Grenzwerte, wobei jedoch ein visueller Vergleich der für den Zählalgorithmus aufbereiteten Bilddaten gezeigt hat, dass nur der höhere Schwellwert zu einer realistischen Objektdifferenzierung führt (hier nicht dargestellt). Die so ermittelten referenzbildabhängigen Schwellwerte wurden in Beziehung zur Standardabweichung der Grauwerte im jeweiligen Referenzbild gesetzt (Eq.1).

Werden die anhand der oben beschriebenen Methodik ermittelten bildstatistikbezogenen Schwellwerte zur Schätzung der Bestockungsdichten eingesetzt, ergeben sich zunächst unkorrigierte Schätzwerte ($BD_{\text{unkorrigiert}}$), die den Referenzwerten gegenübergestellt werden können. Diese Gegenüberstellung erlaubt eine Nachjustierung über eine lineare Beziehung zwischen Soll-Wert und Schätzwert:

$$BD_{\text{korrigiert}} = b^I + b^S \cdot BD_{\text{unkorrigiert}} \quad (\text{Eq.2})$$

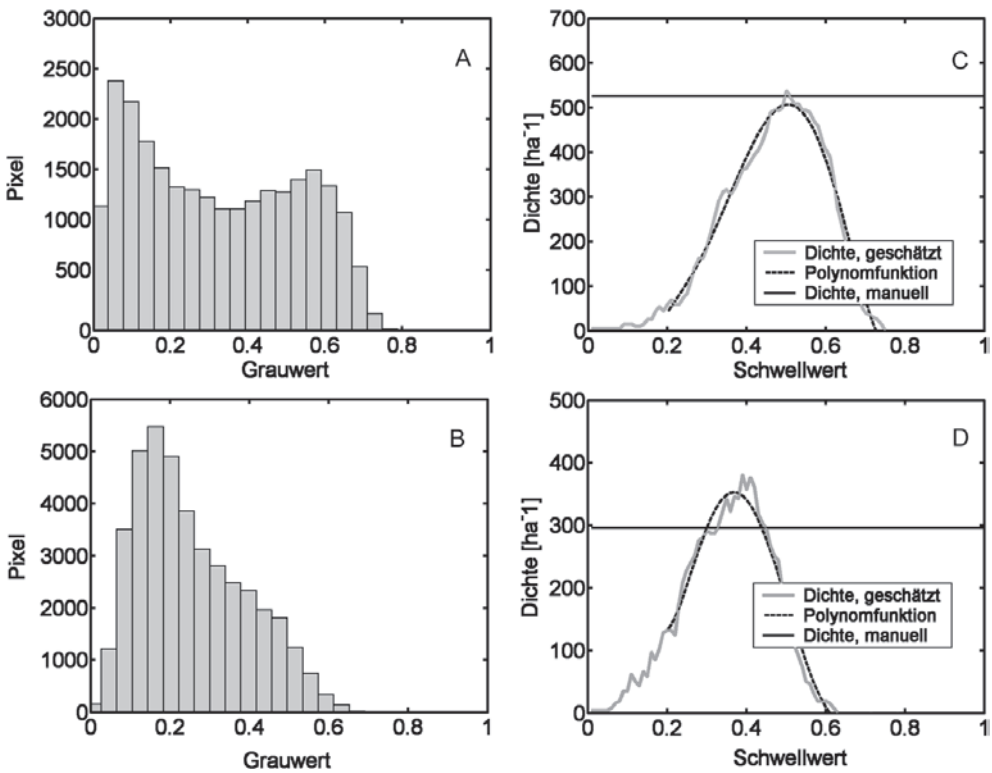


Abb. 2: Grauwert-Histogramm und Schwellwert-Dichte Beziehung für zwei Referenzbilder.

mit BD_{koriert} : an die manuellen Auszählungen angepasste Bestockungsdichte
 $BD_{\text{unkoriert}}$: vom Zählalgorithmus ausgegebene unkorrigierte Bestockungsdichte
 b^I, b^S : Interzept und Steigung der linearen Beziehung zwischen unkorrigierter Bestockungsdichte und manuellem Zählergebnis

3.3 Verifizierung

Zur Verifizierung wurde eine modifizierte Kreuzvalidierung eingesetzt, bei der jeweils 10 der 40 Bestände nicht in die Bestimmung der Kalibrierfunktion eingehen und somit als unabhängige Stichprobe verwendet werden können. Um eine Gesamtheit von 40

Elementen in zwei Stichproben von 30 respektive 10 Elementen aufzuteilen gibt es zirka 850 Millionen Möglichkeiten. 10000 dieser möglichen Kombinationen wurden unter Verwendung eines Zufallsgenerators ausgewählt. Für jede zufällig gewählte Kombination wurde der vollständige Kalibrierungsschritt durchgespielt und die errechneten Kalibrierungsparameter (i.e. $a_i^I, a_i^S, b_i^I, b_i^S$, mit $i = 1:10000$) auf die unabhängige Stichprobe (d.h. die jeweils verbleibenden 10 Bestände) angewendet. Die Ergebnisse der Schwellwertschätzung aus der Bildstandardabweichung (Eq.1) sowie die Anpassung der geschätzten Bestockungsdichten an die Referenzwerte (Eq.2) sind dann für alle 10000 Wiederholungen darstellbar (s. Abschnitt 4). Daneben können in gleicher Weise Root Mean Square Error (RMSE) und Bestimmtheitsmaß (R^2) jeweils

getrennt für Kalibrierungs- und Verifizierungsstichprobe berechnet werden, wobei der RMSE hier definiert ist als

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta x_i^2}$$

mit δx_i : Differenz zwischen geschätztem Wert und Referenzwert
 n : Anzahl der Beobachtungen

Zur Bearbeitung des gesamten Orthophotomosaiks wurden die mittleren Parameterwerte der 10000 Wiederholungen verwendet.

4 Ergebnisse und Diskussion

Um die Qualität der Objekterkennung beurteilen zu können, ist eine visuelle Begutachtung der morphologisch veränderten Bilder unerlässlich. Dies soll am Beispiel eines typischen Referenzbildes demonstriert werden (Abb. 3). Die Abbildung macht deutlich, dass die in (3a) markierten Baumkronen in der Regel durch eine mehr oder weniger große Ansammlung weißer Pixel (in 3c) repräsentiert werden. Nur selten tritt der Fall auf, dass ein im Orthophoto vorhandener Baum gar nicht erkannt wird. Mitunter wird ein Objekt dagegen nicht aufgetrennt und entspricht dann zwei oder mehreren Baumkronen. Dies gilt insbesondere für Referenzbilder mit hohen Bestockungsdichten und räumlich eng zusammenstehenden Bäumen, bei denen unabhängig vom gewählten Schwellwert keine Separierung erzielt wird.

Die Ergebnisse der Schwellwertschätzung aus der Bildstandardabweichung (Eq.1) sowie die Anpassung der geschätzten Bestockungsdichten an die Referenzwerte (Eq.2) sind in Abb.4 für 10000 Wiederholungen in Histogrammform dargestellt. Es wird deutlich, dass die Kalibrierungsparameter normalverteilt sind und die Kalibrierung stabil verläuft. Im Mittel der 10000 Wiederholungen ergeben sich die folgenden Beziehungen (in Klammern die jeweiligen Standardabweichungen der Regressionskoeffizienten):

$$SW = 0,05 (\pm 0,03) + 2,36 (\pm 0,20) \bullet SD$$

$$R^2 = 0,57 \pm 0,04$$

$$BD_{\text{korrigiert}} =$$

$$- 190,7 (\pm 44,1) + 1,47 (\pm 0,10) \bullet BD_{\text{unkorrigiert}}$$

$$R^2 = 0,80 \pm 0,08$$

Histogramme der RMSE und R^2 zwischen Schätz- und Referenzdichten sind in Abb. 5 für den unabhängigen Verifizierungsdatensatz dargestellt. Geschätzte Bestockungsdichten und Referenzdichten sind in Abb. 6 gegenübergestellt, wobei bei den geschätzten Bestockungsdichten zusätzlich die jeweiligen Standardabweichungen der unabhängigen Wiederholungen dargestellt sind. Danach berechnet sich der mittlere RMSE für die Gesamtheit aller (Verifizierungs-)Daten zu 63.3 ha^{-1} (bei einem R^2 von 0,77).

Die positive Beziehung zwischen Standardabweichung im gleitenden Fenster und dem dynamischen Schwellwert lässt sich u.a.

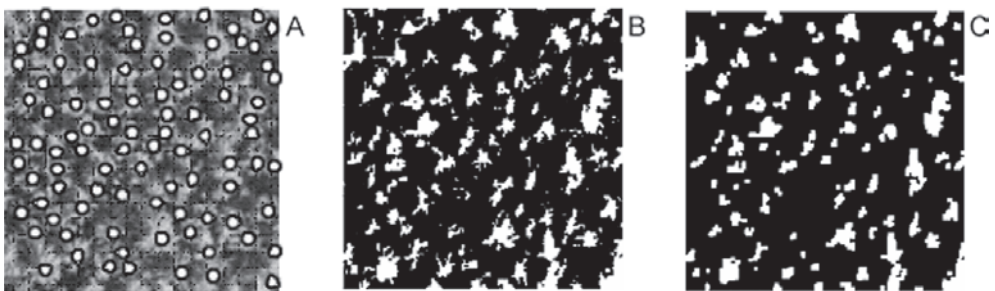


Abb. 3: (a) Bildausschnitt aus dem Orthophoto mit markierten Baumkronen, (b) binarisiertes Bild, (c) Bild nach morphologischem Opening.

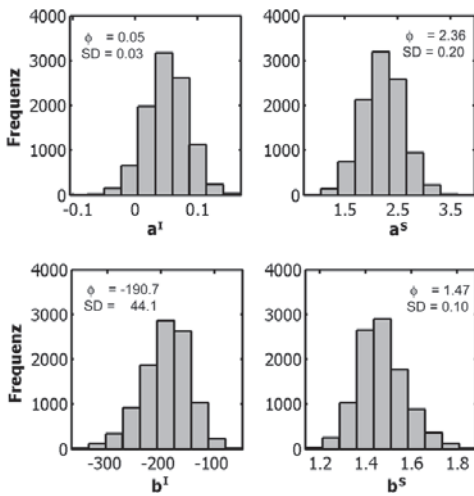


Abb. 4: (oben) Ergebnisse der Schwellwert-schätzung aus der Bildstandardabweichung (Eq.1) und (unten) Anpassung der Schätzdichten an die Referenzdichten (Eq.2).

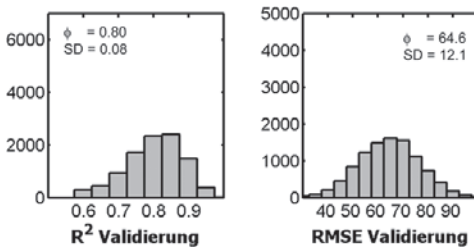


Abb. 5: Verteilung der Korrelationskoeffizienten (R^2) und des Root Mean Square Errors (RMSE) für die Verifizierungsstichproben.

durch die erfolgte Digitalisierung der Orthophotos erklären. Wenn bei dieser Digitalisierung die Grauwertbereiche der einzelnen insgesamt sehr dunklen Bilder unterschiedlich stark gespreizt werden, ergeben sich zwangsläufig positive Beziehungen zwischen Bildstandardabweichung und Bildmittelwert. Damit ergibt sich die Notwendigkeit, den jeweiligen Schwellwert entsprechend anzupassen. Eine solche positive Beziehung zwischen mittlerer Bildhelligkeit und Standardabweichung konnte auch bei unseren Untersuchungen festgestellt werden (hier nicht gezeigt).

Obwohl bereits mit Hilfe der Referenzdaten eine Anpassung zwischen Schwellwert und Standardabweichung erfolgt ist (Eq.1),

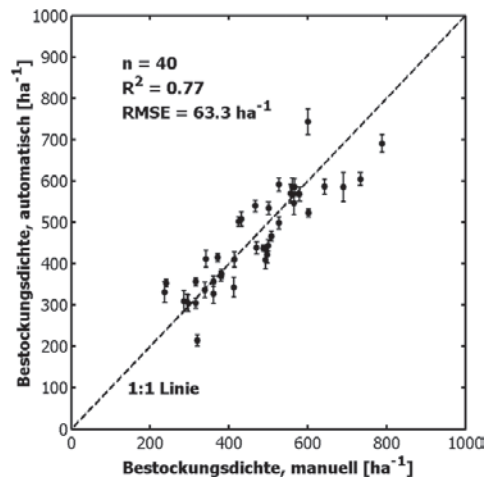


Abb. 6: Automatisch ermittelte gegen manuell bestimmte Bestockungsdichten (Mittelwerte \pm Standardabweichungen der 10000 Wiederholungen aus dem Verifizierungsdatensatz). Die Abweichung von der 1:1-Linie ist für geringe und hohe Bestockungsdichten etwas stärker als für mittlere Werte. Gleiches gilt für die jeweiligen Standardabweichungen (Länge der Fehlerbalken).

weisen die unkorrigierten Schätzergebnisse einen systematischen Fehler auf, der mit Hilfe von Eq.2 nachjustiert werden muss (Abb.4 unten). Die Ursache liegt darin, dass der überwiegende Teil der Referenzbestände mittlere bis hohe Bestockungsdichten aufweist, bei denen verstärkt zusammenhängende Baumkronen auftreten. Dies führt dazu, dass selbst der „optimale“ Schwellwert zu einer Unterschätzung der Bestockungsdichten führt (Abb. 2C) und somit eine Nachjustierung erforderlich wird.

Die für die einzelnen Flächen ermittelten Standardabweichungen der 10000 Wiederholungen zeigen nur eine schwache Abhängigkeit von der Bestockungsdichte der einzelnen Flächen (Tab. 1, letzte Zeile). Gleiches gilt für die absoluten und relativen Abweichungen zwischen Referenzwerten und (gemittelten) Schätzwerten (Tab. 1). Damit ist die Methodik im gesamten Dynamikbereich (hier zwischen 200 und 800 Stämmen pro ha) gleichermaßen einsetzbar.

Durch die Automatisierung der Zählprozedur können dem Algorithmus auch große Orthophotomosaik von mehreren Qua-

Tab. 1: Analyse der Fehlerabhängigkeit des Zählalgorithmus als Funktion der mittleren Referenz-Bestockungsdichte (manuelle Auszählungen). Die jeweiligen Standardabweichungen (in Klammern) ergeben sich aus den Ergebnissen der 10000 Wiederholungen für den unabhängigen Validierungsdatensatz.

	Referenz-Bestockungsdichte		
	niedrig	mittel	hoch
Referenz-Bestockungsdichte [Bäume ha ⁻¹]	< 350	351–550	> 550
Anzahl der Untersuchungsflächen	10	19	11
Mittlere absolute Differenz [Bäume ha ⁻¹] (± SD)	48,3 ± 43,3	45,0 ± 27,5	63,0 ± 49,4
Mittlere relative Differenz [%] (± SD)	17,3 ± 16,9	9,8 ± 6,0	9,6 ± 7,3
Mittlere Standardabweichung der Schätzung [Bäume ha ⁻¹] (± SD)	17,5 ± 5,7	15,0 ± 4,6	21,9 ± 7,2

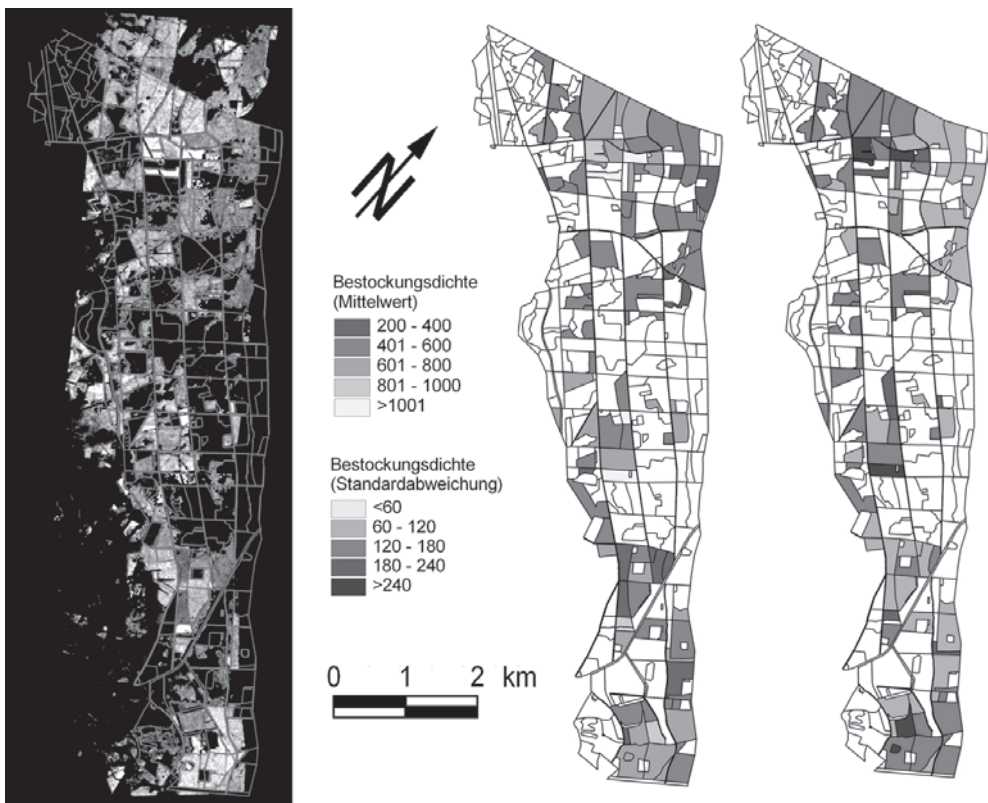


Abb. 7: (links) Ermittelte Bestockungsdichten in einer räumlichen Auflösung von 25 m × 25 m und daraus abgeleitete Bestandsstrukturgrößen; (Mitte) mittlere Bestockungsdichte im jeweiligen Bestand; (rechts) Standardabweichung der Bestockungsdichte im jeweiligen Bestand.

dratkilometern Flächenausdehnung zugeführt werden (Abb. 7a). Auch können die ermittelten Bestockungsdichten und daraus abgeleitete sekundäre Strukturgrößen (u.a.

Variabilität der Bestockungsdichte innerhalb eines Bestandes) ohne Schwierigkeit in ein entsprechenden Forst-GIS zurückgeschrieben werden (Abb. 7bc).

5 Ausblick

Um Informationen zur Bestockungsdichte zu erhalten, war es bislang notwendig, Bäume im Gelände (stichprobenartig für kleine Teilflächen) oder im Luftbild (flächendeckend, aber zeitaufwändig) zu zählen. Das vorgestellte Tool erlaubt dagegen eine flächendeckende und zeitsparende Bestimmung von Bestockungsdichten. Auch wenn sich die ermittelten Regressionskoeffizienten (Eq.1 und 2) nicht ohne weiteres auf andere Untersuchungsräume übertragen lassen, so besteht dennoch die Möglichkeit, den Methodenansatz zu übernehmen.

Im Bezug auf die bereits diskutierten Einsatzgebiete kann die Methode als ausreichend präzise betrachtet werden, wobei sich möglicherweise die Genauigkeit einzelner Teilprozesse, insbesondere des Binarisierungsschrittes, noch weiter optimieren lässt. Zum Beispiel ist denkbar, auch Größen- und Formaspekte mit in die Objektdefinition einfließen zu lassen.

Der Algorithmus kam bereits erfolgreich in Untersuchungen zur Klassifizierung von Baumarten und Altersstufen zum Einsatz (SCHLERF et al. 2002). In einer weiteren Arbeit wurde untersucht, welche Zusammenhänge zwischen der Spektralsignatur von Nadelwaldbeständen und der Bestockungsdichte bestehen und ob diese Zusammenhänge ausreichen, um die Bestockungsdichte aus der spektralen Signatur von Hyperspektralsensoren abzuleiten (ATZBERGER & SCHLERF 2002). Darüber hinaus ist geplant, (i) die abgeleiteten Bestockungsdichten zur Initialisierung bzw. Parametrisierung von dynamischen Stoff- und Energieflussmodellen zu verwenden sowie (ii) die Bestockungsdichten im Rahmen der Inversion physikalisch basierter Reflexionsmodelle einzusetzen (z.B. ATZBERGER 2000 ab). Die ermittelten Bestockungsdichten können unter Berücksichtigung der Dichte-Alter Beziehung auch zur Neugestaltung von Bestandsgrenzen verwendet werden. Da die Methode ebenfalls ungefähre Lagekoordinaten der einzelnen Baumkronen erfasst, ist es auch möglich, diese Informationen im Rahmen von Strukturuntersuchungen (i.e. räumliche

Verteilung der Baumstandorte) zu verwenden.

Danksagung

Die Arbeit wurde von der DFG im Rahmen des SFB 522 „Umwelt und Region“, im Teilprojekt B8 „Fernerkundliche Erfassung, Quantifizierung und Modellierung umweltrelevanter Indikatoren und ihre Integration in ein Umweltinformationssystem“ gefördert. Für die gewährte Unterstützung bedanken sich die Autoren nachdrücklich. Die Autoren danken ebenfalls dem Landesvermessungsamt Rheinland-Pfalz für die Bereitstellung der digitalisierten Orthophotos, Herrn ACHIM RÖDER (Universität Trier) für die Korrektur des Manuskriptes sowie Frau REBECCA RETZLAFF und Herrn JOACHIM HILL (Universität Trier) für die gewährte Unterstützung.

Literatur

- AKCA, A., HILDEBRANDT, G., HUSS, J., KENNEDY, H. & RHODY, B., 1984: Luftbildmessung und Fernerkundung in der Forstwirtschaft. – H. Wichmann Verlag, Karlsruhe, 406 S.
- Arbeitskreis Standortkartierung, 1985: Forstliche Wuchsgebiete und Wuchsbezirke in der Bundesrepublik Deutschland. – Landwirtschaftsverlag Münster Hiltrup, Münster.
- ATZBERGER, C. & SCHLERF, M., 2002: Einsatz Neuronaler Netze zur empirischen Schätzung forstlicher Bestockungsdichten aus hyperspektralen Fernerkundungsdaten. – MÜLLER, RUMPF & MONHEIM (Hrsg.): Umwelt und Region – Aus der Werkstatt des Sonderforschungsbereichs 522, Trier, Selbstverlag, 197–206.
- ATZBERGER, C., 2000a: INFORM: Ein invertierbares Forstreflexionsmodell zur fernerkundlichen Bestimmung biophysikalischer Größen. – In: ALBERTZ (Hrsg.): Photogrammetrie und Fernerkundung – Neue Sensoren – Neue Anwendungen. – Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, **8**: 163–173.
- ATZBERGER, C., 2000b: Development of an invertible forest reflectance model: The INFOR-model. – In: BUCHROITHNER (Hrsg.): A decade of trans-european remote sensing cooperation. – Proceedings of the 20th EARSeL Symposium,

- 14–16 June 2000, Dresden, Balkema Publishers, Lisse, 39–44
- CHEN, J.M. & LEBLANC, S.G., 1997: A four-scale bidirectional reflectance model based on canopy architecture. – *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, **35**(5): 1316–1337.
- GOUGEON, F.A., 1995: A crown-following approach to the automatic delineation of individual tree crowns in high spatial resolution aerial images. – *Canadian Journal of Remote Sensing*, **21**(3): 274–284.
- HARALICK, R.M. & SHAPIRO, L.G., 1985: Survey, image segmentation techniques – *Comput. Vis. Graph. Image Process.*, **29**: 100–132.
- HARALICK, R.M. & SHAPIRO, L.G., 1992: *Computer and Robot Vision*. – Volume I, Addison-Wesley, 28–48.
- KOROL, R.L., MILNER, K.S. & RUNNING, S.W., 1996: Testing a mechanistic model for predicting stand and tree growth. – *Forest Science*, **42**(2): 139–153.
- LARSEN, M., 1997: Crown modelling to find tree top positions in aerial photographs. – *Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition*. – Copenhagen, Denmark, 428–435
- PAL, N.R. & PAL, S.K., 1993: A review on image segmentation techniques. – *Pattern Recognition*, 1277–1294.
- POLLOCK, R.J., 1998: Individual tree recognition based on a synthetic tree crown image model. – In: HILL & LECKIE (Hrsg.): *Automated Interpretation of High Spatial Resolution Digital Imagery for Forestry*. – Pacific Forestry Centre, Victoria, British Columbia, 25–34.
- PRATT, W.K., 1991: *Digital Image Processing*. – John Wiley & Sons, 698 S.
- SAUERBORN, K., TISCHER, M. & GAITSCH, R., 1998: Wege zur Nachhaltigkeit in Forst- und Holzwirtschaft. Umweltgerechte Wirtschaftsentwicklung durch Nutzung der Schlüsselressource Holz. – TAURUS-Diskussionspapier Nr. 2, 64 S.
- SCHLERF, M., ATZBERGER, C. & HILL, J., 2002: Fernerkundliche Kartierung von Baumarten und Altersstufen unter Verwendung von Hyperspektraldaten und Ortholuftbildern. – In: MÜLLER, RUMPF & MONHEIM (Hrsg): *Umwelt und Region – Aus der Werkstatt des Sonderforschungsbereichs 522*, Trier, Selbstverlag, 175–182.
- The Mathworks, 2000: The MathWorks, Inc., 3 Apple Hill Drive, Natick, MA 01760-2098.

Anschriften der Autoren:

- Dr. rer. nat. CLEMENT ATZBERGER, Abteilung Fernerkundung, Universität Trier, Geozentrum H-812, D-54286 Trier.
Tel.: ++49-651-201-4596, Fax: ++49-651-201-3815, e-mail: atzberge@uni-trier.de
- Dipl.-Geogr. MARTIN SCHLERF, Abteilung Fernerkundung, Universität Trier, Geozentrum H-809, D-54286 Trier.
Tel.: ++49-651-201-4593, Fax: ++49-651-201-3815, e-mail: schlerf@uni-trier.de

Manuskript eingereicht: Dezember 2001

Angenommen: Januar 2002